



TREBALL FINAL DE GRAU



ESCOLA
POLITÈCNICA SUPERIOR
UNIVERSITAT DE LLEIDA
INSPIRING THE FUTURE

Estudiant: David Bonet Palau

Titulació: Grau en Enginyeria Mecànica


Títol de Treball Final de Grau: **Disseny del hardware d'un Hoverboard**

Director/a: **Miquel Nogués Aymamí**

Presentació

Mes: Juliol

Any: 2019


 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Pàgina: 2 de 119

Resum

En aquest projecte s'ha estudiant, dissenyat i dimensionat el hardware d'un patinet elèctric, que actualment és popular entre els nens i joves. Per tal de fer que el producte arribes a més públic, s'han adaptat les propietats del patinet per a que transporti una persona adulta, modificant la potència i la resistència dels components.

Per a la realització del projecte s'han observat diferents dissenys, dels quals s'han desestimat algunes idees que els fabricants utilitzen per reduir costos, ja que afecten a la vida útil del patí. S'han fet certes modificacions en els components estructurals per poder unir-los entre ells i amb els components electrònics.

Degut al caràcter docent d'aquest projecte, un objectiu en el desenvolupament del projecte és entendre com funciona cada component electrònic i de quina forma aquest permeten que l'usuari pugui interactuar amb el sistema, obtenint canvis en la trajectòria, direcció i velocitat. Amb els components s'ha elaborat un pressupost, enumerant tant els components que s'han de comprar com els que s'han de fabricar.


 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Pàgina: 3 de 119

Abstract

In this project, the hardware of an electric skate has been studied, designed and dimensioned, which is currently popular among children and young people. In order to make the product reach more public, the properties of the patinet have been adapted to transport an adult, modifying the power and resistance of the components.


To carry out this project, different designs have been considered, and some ideas from manufacturers has been used, while others considered have been rejected in order to reduce costs, due to they affect the useful life of the skate. Some modifications have been made to the structural components to be able to link them and with the electronic components.

Due to the educational nature of this project, one of the objective in the developement of the project is to understand how each electronic component works and how it allows the user to interact with the system, maneuverability, direction and speed. With the components a budget has been done, list of components that must be purchased and also those that must be manufactured.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Pàgina: 4 de 119

Índex general


Capítol 1 Introducció	8
1. Abast del projecte	8
2.Objectius	9
3. Definicions i abreviatures.....	10
3.1. Definicions.....	10
3.2. Nomenclatura.....	11
4. Antecedents	15
4.1. Estudi previ de mercat	15
4.2. Principi de funcionament d'un motor tipus brushless DC.....	16
4.3. Control d'un motor brushless	19
4.4. Alimentació dels motors brushless amb la unitat ESC	23
4.5. Percepció de l'entorn mitjançant una unitat de mesura inercial.....	25
4.6. Microprocessador	27
5. Requeriments	29
Capítol 2 Estudis del sistema.....	31
1. Anàlisi del sistema a controlar	31
1.1. Estudi dinàmic en desequilibrar el sistema per accelerar el sistema.....	32
1.2. Estudi dinàmic en desequilibrar el sistema per assolir una velocitat constant	33
1.3. Resultats dels estudis dinàmics i cinemàtic	34
1.4.Estudi de les condicions de lliscament i bolcar	36
2. Anàlisi del control.....	38
2.1. Variables a controlar	38
2.2. Sensors	38
2.3. Actuadors	40
2.4. Funcionament del desplaçament del dispositiu.....	41
3. Components indispensables en l' hoverboard	42
Capítol 3 Disseny	46
1. Components fonamentals elegits	46
1.1. Components electrònics.....	46
1.2. Components estructurals	51
Capítol 4. Annex	68

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Pàgina: 5 de 119


1. Taula d'antecedents	68
2. Resolució dels estudis dinàmics i cinemàtics	69
3. Característiques elèctriques dels components seleccionats.....	71
3.1. Característiques elèctriques de la unitat de mesura inercial seleccionada ^[18]	71
3.2. Característiques elèctriques del sensor foto interruptor ^[29]	75
3.3. Dimensions de l'Arduino uno ^[30]	76
3.4. Dades del motor Brushless de cub ^[21]	77
Capítol 5. Plànols	78
Capítol 6. Plec de condicions.....	103
1.1. Condicions del disseny per la seguretat d'aquest	103
1.2. Materials i fabricació ^{[31] [32]}	104
1.3. Fitxes tècniques dels components electrònics.....	105
1.3.1. Bateria	105
1.3.3. Unitat de mesura inercial "BNO055"	107
1.3.4. Interruptor fotoelèctric FC-03	108
1.3.5. Arduino.....	108
1.3.6. Motor	109
1.4. Esquema de muntatge i construcció del disseny	110
Capítol 7. Amidaments	113
Capítol 8. Pressupostos	114
Capítol 9. Conclusions	116
Capítol 10. Bibliografia	117

Índex de figures

Il·lustració 1: Representació simplificada de un motor elèctric.....	16
Il·lustració 2: Posicions possibles del camp magnètic en un motor brushless DC	16
Il·lustració 3: Esquema global del control d'un motor brushless DC	17
Il·lustració 4: Relació entre la posició del rotor i alimentació de l'estator	18
Il·lustració 5: Lògica de l'electrònica del motor	18
Il·lustració 6: Senyal PWM estàndard	19
Il·lustració 7: Tensió i corrent que travessa un parell de bobines de l'estator del motor	20
Il·lustració 8: Esquema simplificat del motor	20
Il·lustració 9: Eixos del giroscopi	25
Il·lustració 10: Funcionament del giroscopi MEMS.....	26
Il·lustració 11: vista lateral de la roda en pla i en equilibri en pla.....	31
Il·lustració 12: vista lateral del xassís i el conductor en pla i en equilibri en pla	31
Il·lustració 13: vista lateral del conductor i xassís arrancant i avançant en pla inclinat	32
Il·lustració 14: vista lateral de la roda arrancant i avançant en pla inclinat	32
Il·lustració 15: vista lateral de la roda avançant a velocitat constant en pla inclinat	33
Il·lustració 16: : vista lateral del conductor i xassís avançant a velocitat constant en pla inclinat	33
Il·lustració 17: Diagrames del usuari utilitzant el patí donant una corba a velocitat constant ..	36
Il·lustració 18: Sensor giroscopi, acceleròmetre i magnetòmetre	38
Il·lustració 19: Representació de l'acceleració en cada un dels eixos de l'acceleròmetre.....	39
Il·lustració 20: Ús del sensor fotoelèctric.....	39
Il·lustració 21: Xassís amb pivotat-ge.....	42
Il·lustració 22: Motor brushless Gearless.....	43
Il·lustració 23: Motor brushless Geared.....	43
Il·lustració 24: Diferents dimensions de roda	43
Il·lustració 25: Sensor FC-03	43
Il·lustració 26: Estats de funcionament d'un motor brushless	44
Il·lustració 27: Pin outs IMU BNO055.....	47
Il·lustració 28: Pin out FC-03	47
Il·lustració 29: Diagrama de connexió dels diferents ports del ESC Flipsky amb el motor i el microprocessador.....	48
Il·lustració 30: Pin outs del Arduino UNO 2560	49
Il·lustració 31: comunicació entre els sensors, actuadors i el microprocessadors amb les diferents connexions dels pin.	50
Il·lustració 32: Representació de les carregues estàtiques en el pati amb diagrama de moment i tallant	51
Il·lustració 33: Perfil UPN representant la secció del pati.....	51
Il·lustració 34 Propietats mecàniques del aliatge d'alumini i silici extreptes del llibre Disseny de maquines IV Selecció de materials 2	52
Il·lustració 35 Diagrames sòlid lliures meitat del xassís i boló	53
Il·lustració 36: Eix i coixinets de l'articulació.....	54

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Pàgina: 7 de 119

Il·lustració 37: Punts de l'eix amb tensions màximes i mínimes	55
Il·lustració 38: Propietats del Acer inoxidable del que està fabricat l'eix	56
Il·lustració 39: Gràfica del factor de influencia de la superfície.....	57
Il·lustració 40: Factor de correcció de material	58
Il·lustració 41: Gràfiques de factor de pressió i factor de velocitat	59
Il·lustració 42: Gràfiques de factor de temperatura	59
Il·lustració 43: Gràfic de factors de rugositat	60
Il·lustració 44: Reaccions i forces en el motor en la roda i secció de l'eix amb les reaccions en la part de les orelles	61
Il·lustració 45 Diagrama de tensions	61
Il·lustració 46: Diagrama de tensions provocat pel moment torçor	62
Il·lustració 47: Diagrama sòlid lliure de les orelles amb les forces que aquestes han de suportar i diagrama de moment torçor	65
Il·lustració 48: Suport placa sensors, tapa ESC, suport ESC, Arduino i bateria.	66
Il·lustració 49: Conjunt estructura,sensor giroscopi i foto interruptors units	67
Il·lustració 50: Conjunt estructura, Arduino, ESC i bateria units.....	67
Il·lustració 51: Dimensions del BNO0055.....	74
Il·lustració 52: Ubicació dels forats del Arduino	76
Il·lustració 53: Dimensions Arduino	76
Il·lustració 54: Dimensions del motor a la roda proporcionades pel fabricant.....	77
Il·lustració 55: Eix	110
Il·lustració 56: Unió d'eix, separadors i coixinets.....	110
Il·lustració 57:muntatge del conjunt eix i xassís	110
Il·lustració 58: Acoblar conjunt dels sensors al xassís.....	110
Il·lustració 59: Acoblar conjunt bateria, ESC i Arduino	111
Il·lustració 60: acoblament del conjunt de les rodes	111
Il·lustració 61: Barreres interruptors sensors foto elèctrics	111
Il·lustració 62: Acoblar reposa peus.....	111
Il·lustració 63: Unió de la carcassa superior.....	112
Il·lustració 64: Unió de la carcassa inferior al pati per completar-lo	112

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 8 de 119

Capítol 1 Introducció

L'objectiu d'aquest projecte és dissenyar un patinet auto equilibrat controlat mitjançant un processador Arduino. Aquest patí haurà de tenir unes característiques competitives amb les que actualment hi han al mercat, degut a que les característiques d'aquests son limitades per a un mitja de transport personal.


1. Abast del projecte

En aquest projecte es pretén dissenyar l'estructura, com pot ser el xassís, articulacions, unions, etc., d'un patí auto equilibrable (hoverboard). A més, també s'estudia i s'elegeix la resta de hardware que aquests dispositius necessiten per dur a terme les funcions que han de realitzar com a vehicle unipersonal.

El hardware s'estudia, es valora i posteriorment s'elegeix, segons les necessitats i les propietats mecàniques. Aquets components poden ser: els motors de les rodes que impulsen al patí i mantenen l'equilibri del conjunt, el regulador de corrent i voltatge que alimenta a aquest mateix, els sensors que s'utilitzen per ubicar la inclinació de la taula respecte una referència, les bateries que alimenten el sistema i el microprocessador.

Un cop elegit i dissenyats tots els components es procedeix a fer el muntatge virtual en CAD de tot el conjunt, per tenir una visió global del dispositiu electrònic que s'han seleccionat com a objecte d'aquest treball. A més, també es calcula el pressupost total que tindria aquest projecte en cas de dur se a terme a la realitat.

Si bé és cert que es selecciona el microprocessador que més s'ajusta per a poder assolir els objectius proposats, la programació d'aquest no s'ha considerat dins de l'abast del projecte. Tampoc s'ha entrat en el disseny dels pneumàtics ni en la construcció d'un prototip.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 9 de 119


2.Objectius

Aquest projecte és ideal per aplicar una combinació de moltes de les aptituds i coneixements que s'han après al llarg del grau d'enginyeria mecànica, com pot ser l'estudi dinàmic i cinemàtic del patí en qüestió, per avaluar la potencia que hauran de tenir els motors, així com poder dissenyar uns suports amb un software 3D com és el Creo paramètric per fixar els components i aprofitar al màxim l'espai en el patí.

A més a més és important dissenyar i dimensionar unes articulacions amb coixinets i eixos, components estructurals amb cargols i el xassís de metall per aguantar els esforços que provoca, haver de traslladar una persona adulta.

De la mateixa manera és indispensable enumerar els diferents components electrònics i identificar i enumerar les diverses connexions. S'ha d'aclarir com funciona cada component electrònic i que aporta al conjunt per deixar establert els components mínims per a garantir un funcionament òptim.

La única part electrònica del projecte que no es durà a terme serà programar i calibrar els components electrònics, un cop el projecte finalitzat ha d'estar llest per a que un programador enllaci els diferents components entre ells.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 10 de 119

3. Definicions i abreviatures

3.1. Definicions

Hoverboard: Un vehicle unipersonal motoritzat, que consisteix en dues plataformes unides per una articulació. El moviment que permet realitzar aquesta articulació, juntament amb el microcontrolador i els sensors giroscopis són el mitjà amb el qual el conductor varia la velocitat dels motors de cada roda.

Un control electrònic de velocitat (ESC): és un circuit electrònic que controla i regula la velocitat d'un motor elèctric.


Un circuit eliminador de bateries (BEC): és un circuit electrònic dissenyat per subministrar energia elèctrica a altres circuits sense necessitat de múltiples bateries.

Un controlador proporcional-integral-derivatiu (PID): és un sistema amb retroalimentació de llaç de control àmpliament utilitzat en sistemes de control industrials i en una varietat d'altres aplicacions que requereixen un control de modulació contínua. Un controlador PID calcula contínuament un valor d'error com la diferència entre un valor de consigna desitjat i una variable de procés mesurada i aplica una correcció basada en termes proporcionals, integrals i derivats (denotats P, I i D respectivament).

IMU: Unitat de mesura inercial, compostat per una unitat de mesura inercial està formada per 3 acceleròmetres, 3 giroscopis i, segons el requisit d'encapçalament, 3 magnetòmetres.

Llaç tancat: s'alimenta al controlador amb senyal de error, que es la diferencia entre la senyal de referència i el senyal de realimentació, a fi de reduir el error i portar la sortida del sistema un valor convenient.

FEM: Força electromotriu

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 11 de 119

3.2. Nomenclatura

a = Distància entre la reacció i el on s'aplicala força

$a_{xconductor i xassis}$ = Acceleració del conductor i el xassís

a_{xroda} = Acceleració de la roda

$A_{Contate forat}$ = Area sobre la que reposa el eix de la roda en l'orella

A_n = Area esforç normal de l'eix

$A_{repos eix roda}$ = Area de l'eix que recolça sobre la orella

A_t = Area esforç tallant de l'eix

α = Acceleració angular de la roda

b = Distància entre la força d'un peu i el punt P

β = Adel ngle variable centre de masses del usuari

Crr = Coeficient de rodadura

Cs = Coeficient de seguretat

γ = Àngle de peraltat

d = Amplada coixinet

d_{eix} = Distància de la normal en una roda fins al punt L en l'eixde la roda

D_{ext} = Diametre exterior del coixinet

D_{in} = Diametre interior del coixinet

e = Distancia del centre de l'eix fins als coixinets

f_A = Factor de carga


f_p = Factor de correcció de pressió

f_R = Factor de correcció de la rugositat

f_v = Factor de correcció de velocitat entre superfícies

f_w = Factor de correcció del material de la superfície del cuixinet

f_φ = Factor de correcció de la temperatura

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 12 de 119

F_1 = Força en la roda i en el reposa peus

F_2 = Força en els coixinets del eix

F_{12} = Força de contacte entre roda conductor i xassís

F_{12x} = Força de contacte entre roda conductor i xassís en l'eix X

F_{12z} = Força de contacte entre roda conductor i xassís en l'eix Z

F_d = Força de fricció amb l'aire

F_f = Força de fricció

F_{f1} = Força de fricció provocada per la normal 1

F_{f2} = Força de fricció provocada per la normal 2

H = Distància de l'eix de les rodes fins el centre de masses

H' = Distància del centre de masses al terra

I_{mot} = Intensitat motor

I_z = Moment d'inèrcia respecte "z"

J_0 = Moment polar d'inèrcia

L = Inductància

Lh = Hores de treball

M = Parell d'un dels motors de cada roda

$M_{màx}$ = Moment flector màxim

$M_{flector\ màx\ eix\ roda}$ = Moment flector màxim en l'eix de la roda

M_p = Moment respecte el punt P


η = Rendiment del motor

N = Força normal aplicada al pneumàtic

N_1 = Normal aplicada al pneumàtic més proper al centre de la curvatura

N_2 = Normal aplicada al pneumàtic més llunyar del centre de la curvatura

P = $Massa_{total} \cdot gravetat$

 <div> Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior </div>	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 13 de 119

$P_{cx} = massa_{conductor i xassís} \cdot gravetat$

$P_{roda} = Massa_{roda} \cdot gravetat$

$Pot = Potència lliurada al sistema$

$\sigma_{eq} = Tensió equivalent$

$\sigma_{flector} = Tensió provocada pel moment flector$

$\sigma_{flector\ màx} = Tensió màxima provocada pel moment flector$

$\sigma_{flector\ mín} = Tensió mínima provocada pel moment flector$

$\sigma_G = Tensió límit de la secció transversal de l'eix$

$\sigma_m = Tensió mitja$

$\sigma_n = Tensió normal$

$\theta = Angle que forma el pendent del terreny amb l'horitzontal$

$r_{orella} = Radi exterior de l'orella$

$r_{forat} = Radi gran del forat de l'eix del motor roda$

$R = Radi de curvatura$

$R_g = Grau de repos$

$R_{ext\ eix\ xassís} = Radi extern de l'eix de l'articulació$

$R_1 = Reacció en l'eix de pivotatge$

$R_2 = Reacció en l'eix de pivotatge$

$R_3 = Força d'enllaç eix motor orella$

$R_4 = Força d'enllaç eix motor orella$


$v = Voltatge$

$v_{conductor i xassís} = Velocitat del conductor i xassís$

$v_{mot} = Voltatge motor$

$v_{roda} = Velocitat del centre roda$

$w = Velocitat angular de la roda$

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 14 de 119


μ = *Coeficient de fricció estàtic*

μr = *Braç de palanca de la Normal produït per la resistència a la rodadura*

$\tau_{tallant}$ = *Tensió tallant*

$\tau_{tallant màx}$ = *Tensió tallant*

$\tau_{torçor}$ = *Tensió provocada per el parell motor*

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 15 de 119

4. Antecedents

4.1. Estudi previ de mercat

Els patinets auto equilibrats actuals provenen d'un patí elèctric anterior, que van ser els primers en desenvolupar-se i coneguts comercialment pel nom de Segways. Aquests aparells tenien un manillar on l'usuari podia agafar-se. ^[1]

Actualment, al mercat hi ha una ampla varietat de patinets auto equilibrats, patins que permeten el desplaçament per la ciutat, uns altres per terrenys muntanyosos i de terra, amb diferents velocitats, potències i capacitats de carrega. ^{[1] [2]}

Les velocitats d'aquests aparells oscil·len entre 10 km/h i 20 km/h, el pes de l'aparell varia entre 10 kg i 15 kg, les carregues màximes que suporten aquests aparells d'adults son entre 20 kg i 120 kg.

Per aquests aparells, pujar pendent no ha de suposar un problema, però amb els hoverboards del mercat com a màxim pugen pendent entre 15º fins i 30º, depenent entre altres de l'altura lliure del terra proporcionada pel diàmetre de les rodes i de la massa del usuari. A més a més, és important tenir en compte la potencia dels motors a l'hora de pujar pendent i baixar-les, les potencies dels aparells en el mercat oscil·len entre 350 W i 1000 W.

L'autonomia d'aquests aparells permeten desplaçar-se entre 10 km i 20 km, una distancia llarga tenint en compte que és un desplaçament per ciutat. Encara que si es vol utilitzar fora ciutat s'ha de tenir en compte que és una distancia bastant limitada. Tenen una capacitat de carrega entre 4300 mAh i 4400 mAh.

Hi ha una ampla varietat d'aquets medis de desplaçament alternatius, cada un amb seva particularitat com venen a ser els manillars als Segways, sense manillar als hoverboard i amb suspensió als tot terrenys. A la taula 1 de l'Annex 1 és pot apreciar les diferents característiques més importats que ofereixen els patins auto equilibrats.

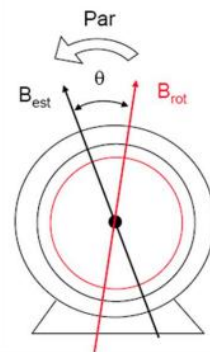
4.2. Principi de funcionament d'un motor tipus brushless DC

Abans de començar a dissenyar cadascuna de les etapes del desenvolupament del prototip, és clau per a la correcta comprensió del seu funcionament, conèixer com treballen els principals components per fabricar el patinet.

4.2.1. Principi de funcionament i control bàsic

Com en tots els motors elèctrics, el seu funcionament es basa en la força d'atracció que experimenten dos camps magnètics no alineats. El gir del rotor s'aconsegueix fixant en ell un camp magnètic i evitant que s'alineï amb el camp magnètic generat en l'estator. Suposant una distribució sinusoidal a l'entreferro, el parell aconseguit d'aquesta operació és proporcional a la intensitat dels camps creats i al sinus de l'angle que formen entre ells, com s'indica a la següent equació.

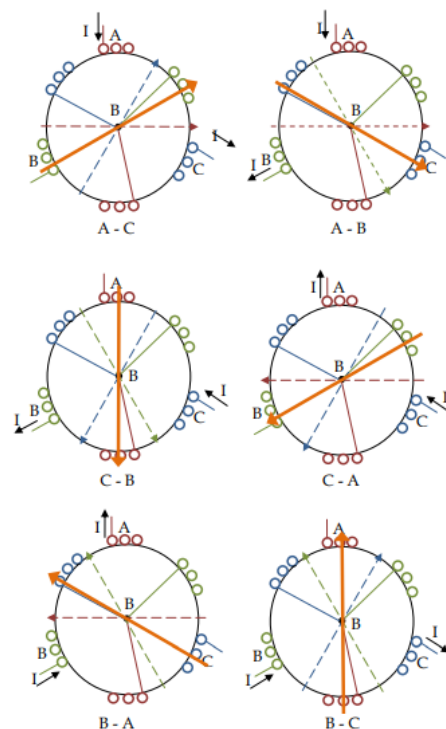
$$Eq\ 1: Par = k \cdot B_{est} \cdot B_{rot} \cdot \sin(\theta)$$




Il·lustració 1: Representació simplificada de un motor elèctric

En un brushless DC el rotor conté un imant permanent, que es suposarà inicialment format per un parell de pols per simplificar l'explicació, encara que podrien ser diversos.

El estator està immòbil i en ell, hi han tres bobines separades 120° geomètricament i unides en un punt comú. Cadascuna d'elles pot generar un camp magnètic en una única direcció i tots dos sentits, segons la corrent que la travessi. Per tant, amb aquesta configuració s'obtenen 3 adreces de camp magnètic, cadascuna d'elles en dos sentits diferents, és a dir, 6 orientacions de camp magnètic. A la il·lustració 2 es pot observar com es pot generar un camp magnètic que gira de forma discontinua, seguint una seqüència determinada d'alimentació de les bobines: Amb una fletxa taronja i continua es representa el camp magnètic suma de les dues bobines alimentades. Amb fletxa discontinua, el color corresponent a cada bobina i el de cadascuna de les components que creen el camp total. Les línies contínues amb els colors respectius de cada bobina simbolitzen el punt comú de les tres. És representa amb sol tres enrotllaments per simplificar l'esquema.

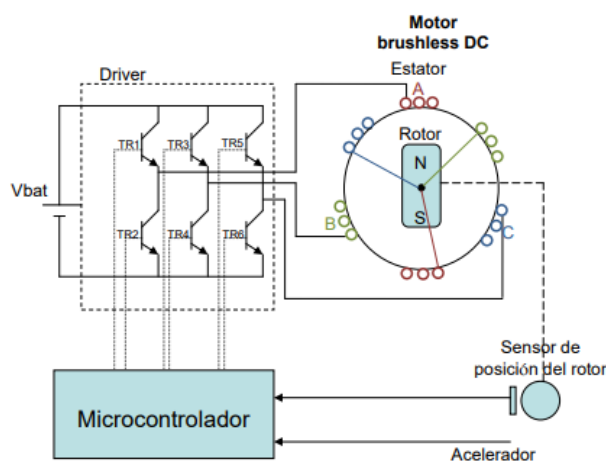


Il·lustració 2: Posicions possibles del camp magnètic en un motor brushless DC

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 17 de 119

Aconseguir que un motor d'aquest tipus giri en el sentit que és desitja requereix generar el camp magnètic amb l'orientació adequada en cada moment. Per a això és fa servir un sistema com el esquematitzat a la il·lustració 3: uns sensors de posició d'efecte Hall degudament alimentats informen de la situació del rotor mitjançant tres senyals elèctrics, aquesta informació és processada pel microprocessador que envia les senyals apropiades al controlador, que conté un joc de transistors connectats amb les bobines del motor, a les que alimenta convenientment per obtenir el camp desitjat.

Els transistors es tanquen de dos en dos, segons el camí que es vulgui imposar al corrent per generar el camp magnètic de l'estator. Per exemple, per aconseguir la primera posició del camp magnètic en la seqüència representada a la il·lustració 2 (A-C), caldria tancar els transistors 1 i 6. És important vigilar que no es tanquin els dos transistors d'una mateixa bobina (d'una "columna" segons l'esquema) ja que es produiria un curtcircuit.

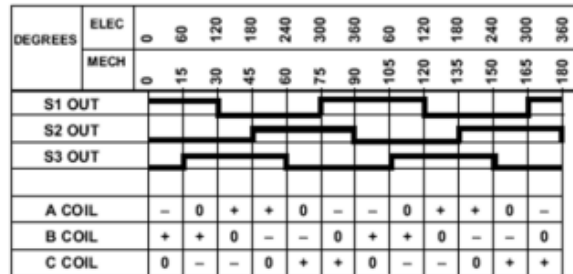


Il·lustració 3: Esquema global del control d'un motor brushless DC

Malgrat l'esquema representat, habitualment aquest tipus de motors té diversos parells de pols, per exemple 4. No obstant això, tot just influeix a l'hora de dissenyar el control. Pel que fa al connexionat i la programació del microprocessador, no hi ha cap diferència, tret que per al càlcul de la velocitat cal considerar que en rebre el mateix senyal dels sensors de posició d'efecte Hall del rotor, aquest no ha tornat a la mateixa posició, sinó que només ha transcorregut un quart de volta. Això s'explica perquè els 360 ° elèctrics que rep el microprocessador es corresponen amb $360^\circ / 4 = 90^\circ$ mecànics. D'aquesta manera s'aconsegueix que el motor tingui un funcionament més fi i continu, ja que en comptes de tenir 6 posicions possibles de camp magnètic, té $6 \cdot 4 = 24$ posicions en una volta completa.

La taula que s'adjunta a continuació és un extracte del full de característiques d'un motor en la qual s'indica que bobines s'han d'alimentar per mitja volta mecànica. Es simbolitza amb un signe "+" aquella per la qual ha d'entrar la intensitat i amb un signe "-" per la qual el corrent ha de sortir. Les bobines es denominen A, B i C, com a la

il·lustració 2. Es pot apreciar la relació que hi ha entre els graus elèctrics i els graus mecànics a l'existir quatre parells de pols:




Il·lustració 4: Relació entre la posició del rotor i alimentació de l'estator

A la següent il·lustració es resumeix la mateixa informació, afegint quins transistors s'han d'activar per aconseguir l'alimentació requerida. Un 1 significa rebre un pols dels mateixos volts amb què s'alimenta els sensors de posició del rotor mentre que un 0 es tradueix com no rebre cap tensió, és a dir, mateix voltatge que la terra del nostre sistema (lògica positiva).

Sensores de posició			Alimentación	Transistores
S3	S2	S1	-	-
0	0	1	B-A	TR 3 - TR 2
1	0	1	B-C	TR 3 - TR 6
1	0	0	A-C	TR 1 - TR 6
1	1	0	A-B	TR 1 - TR 4
0	1	0	C-B	TR 5 - TR 4
0	1	1	C-A	TR 5 - TR 2

Il·lustració 5: Lògica de l'electrònica del motor

El circuit dels transistors, que s'utilitza per alimentar de bobines i on es fan les commutacions serà substituït per un component ESC.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 19 de 119

4.3. Control d'un motor brushless

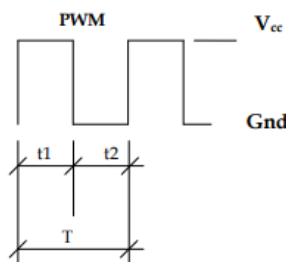
4.3.1. Control del parell mitjançant la regulació de corrent

S'ha vist com es pot generar un parell magnètic en un motor brushless DC, i per tant sembla evident que el següent pas és regular aquest parell. Atenent a l'equació 1 es dedueix que per a això, la possibilitat més raonable és variar la intensitat del camp magnètic de l'estator, ja que, el del rotor és constant al estar format per uns polsos magnètics fixos. Per a això, s'ha de regular la intensitat que recorren les seves bobines, que ve determinada per la tensió amb que s'alimenten, segons una relació no lineal.

En un primer moment es podria pensar en utilitzar un divisor de tensió però es troba amb els desavantatges de les significatives pèrdues que comporta i la seva complexitat, ja que s'hauria de valorar la tensió que requereix i la intensitat que es desvia cap al motor per aconseguir-la.

Per tant, l'alternativa òptima per aconseguir un parell variable és alimentar les bobines del motor amb un senyal de PWM (Pulse Width Modulation) que permet variar de forma molt senzilla la tensió mitjana proporcionada en les bobines i per tant la seva intensitat, el seu camp magnètic i conseqüentment el parell que proporciona el motor. La freqüència està triada en base a un compromís entre el rissat del corrent, obtenir unes pèrdues per commutació raonables i que aquesta freqüència de commutació no sigui audible.


Per aconseguir el parell requerit, l'usuari controla de manera indirecta, mitjançant l'inclinació del patí, el factor de servei d'aquest senyal de PWM, és a dir, el temps que sotmetem les bobines del motor a la tensió de la bateria i el temps en que talla l'alimentació i aquestes romanen a 0V.



Il·lustració 6: Senyal PWM estàndard

La relació que hi ha entre aquests temps caracteritza al senyal de PWM i es denomina factor de servei: es defineix com el quocient entre $t1/T$ seguint la nomenclatura indicada a la Figura 6. De manera que si es vol anar a màxima velocitat el factor de servei ha de ser igual a 1, tot i que possiblement no s'arribarà a aquest extrem, ja que es limitarà la velocitat a certes rpm per evitar situacions límits per al motor.

Com ja s'ha esmentat, en controlar el valor mitjà de la tensió en les bobines es pot variar el parell, però aquesta relació no és lineal. En variar la intensitat s'aconsegueixen variacions en el camp magnètic en la mateixa proporció, que varia'n la tensió, ja que segueix una relació lineal sempre que no s'arribi a la saturació de la corba de histèresi del ferro, i per tant en el par del patinet segons l'equació 1. Es dedueix del raonament

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 20 de 119

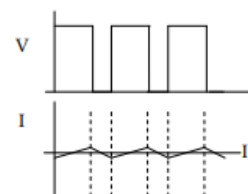
que la relació entre la intensitat i el parell és lineal. D'altra banda la potència lliurada pel sistema es pot calcular mecànicament o elèctricament amb idèntics resultats:

$$Eq\ 2: Pot = M \cdot \omega = V_{mot} \cdot I_{mot} \cdot \eta$$

El subíndex *mot*, fa referència al fet que es tracta de la tensió amb què s'alimenta i el corrent que circula pel motor, que normalment no serà igual a la corresponent a la bateria. El parell i la velocitat en canvi, sempre fan referència al motor. D'aquesta igualtat s'obté la relació:

$$Eq\ 3: V_{mot} = \frac{M}{I_{mot} \cdot \eta} \cdot \omega = K \cdot \omega$$

Sabent que el quocient entre el parell i la intensitat és una constant al existir una dependència lineal entre els dos paràmetres, s'ha comprovat a la vista d'aquesta equació, que la velocitat és directament proporcional a la tensió mitjana de les bobines. Per tant, es conclou que en modificar la tensió de les bobines afecta de manera directa en la velocitat del patí.



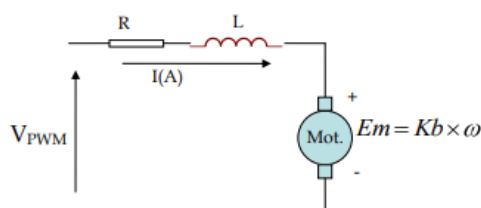
Il·lustració 7: Tensió i corrent que travessa un parell de bobines de l'estator del motor

Cal una reflexió per reconèixer que el que l'usuari vol controlar amb l'accelerador d'un patinet, igual que amb el d'una moto o un cotxe, és el parell i no la velocitat: si fos així en deixar anar l'accelerador en qualsevol vehicle aquest tendria a frenar fins a aturar-se totalment, ja que se li estaria demanant velocitat zero, la qual cosa òbviament no succeeix. No obstant això, en variar la tensió i amb això la velocitat del motor, modificant la intensitat mitjana que recorre les bobines i conseqüentment el parell. La il·lustració 7 dóna una idea més precisa d'aquesta relació entre tensió i intensitat. El corrent que travessa la parella de bobines del motor dependrà de la variació temporal de la intensitat que circula per una bobina segons la relació:


$$Eq\ 4: v = L \cdot \frac{\partial i}{\partial t}$$

La *v* de l'equació 4 és la diferència entre la tensió d'alimentació i la induïda del rotor. Ja que al girar amb un camp magnètic fix en el rotor, indueix una tensió sobre les bobines proporcional a la seva velocitat i oposada a l'alimentació.


Un esquema elèctric i simplificat del motor seria el representat en la il·lustració 8, en el qual la resistència pot menysprear en càlculs posteriors, doncs és menyspreable enfront del valor de la bobina:



Il·lustració 8: Esquema simplificat del motor

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 21 de 119

És per tant coherent la relació que hi ha entre la intensitat i la tensió d'alimentació de les bobines, ja que quan el PWM està actiu la tensió és més gran que la induïda pel rotor i el corrent tendeix a augmentar, mentre que quan es treu l'alimentació les bobines tenen una tensió negativa, de manera que la intensitat tendeix a disminuir.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 22 de 119

4.3.2. Control PID

L'usuari que condueix el patí, accionarà l'accelerador en la mesura que el consideri oportú (Inclinant la taula). A més a més, el microprocessador llegirà les lectures de l'acceleració proporcionada pels sensors inercials. En el moment que l'usuari vol accelerar, el microprocessador capta una pertorbació en l'angle de la posició de la taula respecte de l'horitzontal. Després de calcular i filtrar les vibracions provocades pel terreny, mitjançant un control proporcional integral i derivatiu, el microprocessador és capaç de donar el corrent necessari als motors per desplaçar el vehicle com l'usuari desitja, i té l'avantatge d'oferir una resposta molt ràpida i una compensació del senyal d'error immediata en el cas de pertorbacions.


El control proporcional del sistema originarà una resposta lineal que pot originar un error. El control integral del sistema eliminarà el error, provocat per pertorbacions exteriors i els quals no poden ser corregits pel control proporcional.

El control derivatiu respon a la velocitat del canvi del error i produeix una correcció significativa abans de que la magnitud del error es torni massa gran. El control derivatiu preveu l'error, inicia una acció correctiva oportuna i tendeix a augmentar la estabilitat del sistema.

Aquest control, compararà el corrent mesurat en el motor, les lectures de velocitats i acceleracions, el control PID pertinent variarà el factor de servei de PWM oportunament fins que la diferència entre la intensitat requerida i la mesura sigui nul·la. Aquest procés es repetirà contínuament, mentre el patinet està en funcionament i les barreres dels sensors òptics activin aquets. És per això que es pot afirmar que el control del sistema haurà de ser de llaç tancat.

El control realitzarà un càlcul complex utilitzant la informació proporcionada pels giroscopis i acceleròmetres, per determinar l'angle si no el proporciona el mateix sensor i per eliminar possibles lectures errònies provocades per les irregularitats en el terreny percebudes pel patí i poder filtrar les senyals, que serviran per predir possibles males lectures completant la part del control derivatiu.

El control PI o PID quedarà fora de l'abast del treball, posteriorment si es vol continuar i/o fer millores s'haurà d'explicar amb més detall, degut a que és de competència de la programació electrònica.

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 23 de 119

4.4. Alimentació dels motors brushless amb la unitat ESC

Un motor brushless requereix de molta més intensitat i voltatge del que un microprocessador pot proporcionar, per aquest motiu és necessària l' incorporació d'una etapa de potència o driver per controlar la velocitat amb una bateria lo suficientment potent per alimentar els dos motors.


Un variador de velocitat (ESC) ^[3] està compost per un circuit amb diversos components electrònics. El propòsit del variador és variar la velocitat d'un motor elèctric juntament amb el sentit de gir. Independent del tipus de motor elèctric al qual es connecta el variador, l'ESC interpreta informació de control. Els ESC varien el rati de canvi d'una xarxa de transistors d'efecte de camp (FET). Funcionen com un interruptor, si l'interruptor s'obre, el motor estaria aturat. Si es tanca, avançaria al màxim. Si s'obre i tanca ràpidament, el motor avança a velocitat intermèdia.

Un ESC, són diversos transistors en paral·lel, que s'obre i tanca a alta velocitat un percentatge del temps. Per aturar el motor s'obrien els transistors, i si es tanquen els transistors el motor aniria a al màxim: com més temps del total condueixi, major serà la velocitat. La variació en els canvis d'aquests transistors és el que causa el so característic dels motors elèctrics. Aquest grup de transistors fa possible un control més suau i precís de la velocitat de gir dels motors. En altres paraules és el driver de l' il·lustració 3.

Els variadors, són controladors de Modulació per Ample de Punts (PWM) per controlar motors elèctrics. Del receptor del patí, mana una senyal PWM a ESC amb variacions d'1 a 2 ms. A la primera el motor esta aturat, de 1 a 1,5 ms el motor funcionarà en un sentit i de 1,5 a 2ms el motor funcionarà en l'altre sentit. Els variadors per a motors brushless creen un corrent altern trifàsic a partir de corrent continu provinent de la bateria.

Per tal d'obtenir una referència de la posició del rotor s'utilitzarà els sensors Halls per a determinar la posició d'aquest, i d'aquesta manera poder aplicar correctament els vectors d'impulsos. En detectar el sensor el camp creat per el imant, genera un impuls que registrarà l'Arduino i d'aquesta manera localitza en quina posició se situa el rotor.

La majoria dels ESC incorporen un sistema BEC (Sistema d'eliminació de bateries), el qual, fa possible regular un voltatge estable per poder fer funcionar els leds, els sensors i el microprocessador. Això elimina la necessitat de portar una bateria extra dins del patí per alimentar aquests components, degut a que amb la mateixa bateria és poden aconseguir un voltatge a 48V per alimentar els motors i un altre de 5v.


 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 24 de 119

Variadors BEC Lineals:

Els variadors BEC lineals utilitzen resistors per baixar el voltatge que proporciona la bateria de liti. Això fa possible que el microprocessador i els sensors funcionin a 5 volts sense que es cremi per l'alt voltatge de la bateria. A mesura que la bateria té més cel·les, o volts, i la diferència de tensió és més gran, i per tant la resistència a instal·lar serà més gran i més potencia tèrmica es dissiparà.

Variadors BEC conmutats:

Aquest tipus de variadors canvia el voltatge amb una alta freqüència per a baixar-lo de manera més efectiva. D'aquesta manera, s'aconsegueix reduir el voltatge sense generar calor o malbaratament d'energia. Algun d'aquests variadors ofereixen la possibilitat de regular el corrent que li arriba al microprocessador a 5v. Com a regla general, és recomanable utilitzar aquest tipus de variador per a bateries amb 4 o més cel·les.

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 25 de 119

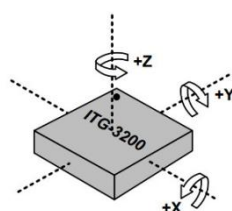
4.5. Percepció de l'entorn mitjançant una unitat de mesura inercial

Una unitat de mesura inercial funciona mitjançant la detecció d'acceleració lineal mitjançant un o més acceleròmetres i la velocitat de rotació mitjançant un o més giroscopis. Alguns també inclouen un magnetòmetre. Les configuracions típiques contenen un acceleròmetre, un giroscopi i un magnetòmetre per cada un dels tres eixos del vehicle.

Un acceleròmetre^[4] és un dispositiu electromecànic que mesurarà les forces d'acceleració. Aquestes forces poden ser estàtiques, com la força de gravetat constant que empeny cap a baix, o que poden ser dinàmiques. Mitjançant la mesura de la quantitat d'acceleració estàtica a causa de la gravetat, es pot esbrinar l'angle en què el dispositiu està inclinat respecte a la terra. Al detectar la quantitat d'acceleració dinàmica, es pot analitzar la manera en què el dispositiu es mou

Alguns acceleròmetres utilitzen l'efecte piezoelèctric: contenen estructures cristal·lines microscòpiques que es ressalten per forces acceleradores, cosa que fa que es generi una tensió. Una altra manera de fer-ho és detectar els canvis de capacitat. Si es té dues microestructures al costat de l'altra i tenen una certa capacitat entre elles. Si una força acceleradora mou una de les estructures, la capacitat canviaria. S'afegeixen alguns circuits per convertir la capacitat a la tensió i s'obté un acceleròmetre.

Els giroscopis^[5], o giròmetres, són dispositius que permeten mesurar i mantenir la direcció del moment cinètic. El MEMS (sistemes microelectromecànics) giroscopis són petits sensors, de baix cost per mesurar la velocitat angular baixes. Les unitats de velocitat angular es mesuren en graus per segon ($^{\circ} / s$) o revolucions per segon (RPS). Es poden utilitzar per determinar l'orientació i es troben en la majoria dels sistemes de navegació autònoms.

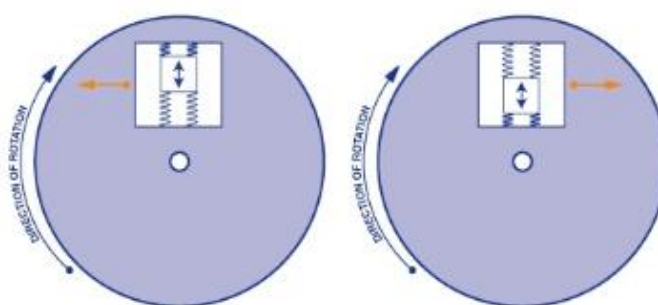


Il·lustració 9: Eixos del giroscopi

Un giroscopi MEMS de 3 eixos, similar a la que es mostra a sobre a la il·lustració 9, pot mesurar la rotació al voltant de tres eixos: X, Y, i Z. Alguns vénen en varietats d'eix simple i doble, però el giroscopi de tres eixos en un sol xip són cada vegada més petit, menys costós i més popular.

El principi físic en el qual es basa el sensor MEMS és que un objecte vibrant tendeix a continuar vibrant en el mateix pla fins i tot si el seu suport gira. L'efecte Coriolis fa que l'objecte exerceixi una força sobre el seu suport, i mesurant aquesta força es pot determinar la velocitat de rotació.

El sensor MEMS, dins d'un giroscopi és molt petit (entre 1 a 100 micròmetres, la mida d'un cabell humà). Quan es fa girar el giroscopi, una petita massa de ressonància es desplaça amb els canvis de velocitat angular, com es pot veure en la il·lustració 10. Aquest moviment es converteix en senyals elèctrics de molt baixes corrents que es poden amplificar per ser llegides per un microprocessador.




Il·lustració 10: Funcionament del giroscopi MEMS

Els giroscopis poden tenir ja sigui una interfície de comunicació digital o analògica.

El giroscopi amb una interfície digital en general utilitzen protocols de comunicació I2C o SPI. L'ús d'aquestes interfícies permet una connexió fàcil a un microprocessador. Una de les limitacions d'una interfície digital és la velocitat de mostreig màxima. L'I2C té una freqüència de mostreig màxim de 400 Hz. El SPI, d'altra banda, pot tenir una freqüència de mostreig molt més alta.

Giroscopis amb una interfície analògica representen la velocitat de rotació amb un voltatge variable, generalment entre terra i la tensió d'alimentació. Un ADC en un microprocessador pot ser utilitzat per llegir el senyal. Giroscopis analògics poden ser menys costosos i, de vegades més precis, depenent de com s'està llegint el senyal analògic.

Giroscopis MEMS són generalment dispositius de baixa potència, el corrent que consumeixen estan en mA i, de vegades en el rang de μA . La tensió d'alimentació per giroscopis és generalment 5V o menys. Giroscopis digitals poden tenir voltatges lògics seleccionables o funcionar a la tensió d'alimentació. Per connectar qualsevol interfície digital s'han de connectar 5V a la línia de 5V. Els giroscopis amb interfícies digitals poden tenir modes d'alimentació i de molt baix consum que els permeten ser utilitzats en aplicacions que funcionen amb bateries.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 27 de 119

4.6. Microprocessador

Es diu microprocessador^[6] o simplement processador al circuit integrat central d'un sistema informàtic, on es duen a terme les operacions lògiques i aritmètiques (càlculs) per permetre l'execució dels programes, des del Sistema Operatiu fins al Programari d'aplicació.

Un microprocessador pot operar amb una o més CPU (Unitats Centrals de Processament), constituïdes cadascuna per registres, una unitat de control, una unitat aritmètic-lògica i una unitat de càlcul en coma flotant (o coprocessador matemàtic).

Mentre que un mateix microprocessador pot comptar amb un o més nuclis físics o lògics, en els quals es duu a terme tota la tasca de càlcul, un mateix sistema informàtic pot disposar de diversos processadors treballant en paral·lel.


El rendiment d'aquests processadors és pot deduir a partir de la freqüència de rellotge (Hz) i la capacitat de emmagatzematge d'una memòria digital (bit), per distingir entre la potència d'uns i d'altres.

Els microprocessadors s'assemblen una petita computadora digital en miniatura, per la qual cosa presenta la seva pròpia arquitectura i realitza operacions sota un programa de control. Aquesta arquitectura es compon de:

- Encapsulat: Una coberta ceràmica que recobreix el silici i el protegeix dels elements (com l'oxigen de l'aire).
- Memòria Caché: Un tipus de memòria ultra ràpida disponible per al processador, de manera que no empri memòria RAM sinó quan sigui necessari, ja que en els diversos nivells de la memòria es guarden dades en ús per a la seva recuperació immediata.
- Coprocessador matemàtic: és la porció del processador que s'encarrega de les operacions lògiques i formals.
- Registres: Una memòria petita treball en el processador, dissenyada per portar el control del seu propi funcionament i condicions.
- Ports i pins: Els conductes que permeten al processador comunicar la informació amb la resta dels components del sistema.


Un microprocessador opera a partir d'una sèrie d'instruccions elementals que són preprogramades i emmagatzemades sota la forma de codi binari. Aquestes instruccions estan organitzades en la memòria principal, i es donen d'acord a diverses fases, que són:

- Prefetch: Prelectura de la instrucció des de la memòria principal del sistema.
- Fetch: Enviament de la instrucció específica al descodificador.
- Descodificació: Traducció de la instrucció en una sèrie d'operacions a realitzar, i lectura dels operands necessaris per fer-ho.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 28 de 119

- Execució: Realització de la instrucció pels components del sistema.
- Escripura : Gravat dels resultats de tornada a la memòria principal, o en els registres.

Aquestes fases es duen a terme en diversos cicles del CPU, i la seva durada depèn de la freqüència a la que treballi el microprocessador.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 29 de 119

5. Requeriments

Per a que realment la millora d'aquest tipus de patí sigui apreciable una de les característiques més importants és augmentar la velocitat, la qual interessaria fixar el màxim en 20 km/h, per no superar la velocitat màxima permesa per la DGT^[7], encara que es dotarà l'aparell amb una velocitat màxima de 30 km/h per utilitzar-la en un cas necessari, en un entorn segur i/o de competició. Un altra característica molt important a millorar serà el pendent que vèncer, actualment els hoverboards pugen pendent de fins a 30°. Per aquest motiu el llinar màxim de pendent s'hauria d'eleva respecte els actuals. Per tal d'assolir aquestes dues característiques caldrà augmentar la potència de cada roda i modificar el xassís adequadament per evitar interferències amb el terra i poder equipar tots els components necessaris. Per millorar l'experiència de l'usuari les rodes haurien de tenir un diàmetre prou gran com amortir els clots o irregularitats del terreny, que hi poden haver a la ciutat.


L'autonomia de l'hoverboard és veurà reduïda, a l'exigir-li major potència. Per aquest motiu és important augmentar la capacitat de les bateries del dispositiu, ja que 20 km d'autonomia són pocs per un vehicle de transport i s'haurien d'ampliar com a mínim a 30 km. Per aquest motiu, un al·licient per prolongar la durada de les bateries és instal·lar un fre regeneratiu que recarregui amb les frenades del patí, transformant part de l'energia cinètica en electricitat de nou i sigui emmagatzemada a les bateries.

Per altra banda, al augmentar la potència dels motors i l'autonomia l'hoverboard augmentarà de pes. S'ha de parar compte, ja que el pes màxim de l'aparell hauria d'estar entre 20 i 30 kg. Degut a que si l'aparell es queda sense bateria l'usuari hauria de carregar amb ell fins a poder-lo carregar de nou.

El disseny del programa del microprocessador calibrarà el pes de la persona, per adaptar les condicions de maneig a persones entre 60 - 90 kg. Aquest aparell de transport personal està encarat cap a un públic adult, degut a les altes prestacions d'aquest com pot ser l'alta velocitats que el dispositiu pot assolir. Per poder assolir aquestes altes velocitats s'ha de limitar el pes de l'usuari per utilitzar motors d'un voltatge relativament baix


Així doncs, per concloure aquest apartat fonamental de requeriments, cal acabar dient que, els objectius del present treball són:

- Mobilitat urbana.
- Velocitat màxima assolida per l' hoverboard de 30 km/h.
- Pendent màxim a vèncer d'un 30%.
- Autonomia de l'objecte tractat de 30 km.
- Possibilitat d'introduir un fre regeneratiu.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 1 Introducció
	Pàgina: 30 de 119

- Potència suficient per superar els pendents de 30º i velocitats de 30 km/h.
- Rodes prou grans per superar els pendents i evitar interferències amb el terreny de la ciutat.
- Capacitat de carga màxima 90 kg.

A més de tots els requeriments anteriorment mencionats, cal dir que un dels objectius principals d'aquest treball de final de grau és el disseny del xassís i dels diferents components emprats en la realització del objecte, que més endavant es comentarà d'una manera més detallada.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 2 Estudis del sistema
	Pàgina: 31 de 119

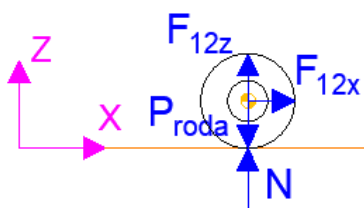
Capítol 2 Estudis del sistema

1. Anàlisi del sistema a controlar

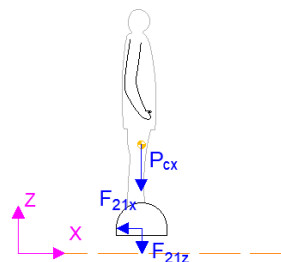
En el moment en què l'usuari puja a un hoverboard, aquest és susceptible a un conjunt de forces determinades segons la posició del hoverboard i el terreny, que són necessàries controlar per tal de mantenir l'equilibri i/o desplaçar-se sobre aquest. A continuació s'estudiaran les situacions més genèriques i representatives que ajudaran a entendre i extreure les expressions que governaran el sistema. Les diferents situacions són quan es puja damunt el patí, quan es vol avançar i retrocedir en pla, en pla inclinat i es faran dos diagrames de sòlids lliures, roda usuari i xassís, per fer l'estudi de cada cas.

Situació d'equilibri en pla

Aquesta és la postura que s'adopta en quan l'usuari puja al patí auto equilibrat. En l'il·lustració 11 es poden veure les forces que actuen en les rodes i en l'il·lustració 12 es poden veure les forces, que actuen en el cos xassís i usuari.



Il·lustració 11: vista lateral de la roda en pla i en equilibri en pla



Il·lustració 12: vista lateral del xassís i el conductor en pla i en equilibri en pla

$$\begin{cases} \sum F_{zr} = 0 \\ \sum F_{xr} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} N + F_{12z} - P_{rodà} = 0 \\ F_{12x} = 0 \end{cases}$$


$$\begin{cases} \sum F_{zcx} = 0 \\ \sum F_{xcx} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} -F_{21z} - P_{cx} = 0 \\ F_{21x} = 0 \end{cases}$$

És indispensable que a l'hora d'aplicar un moment sobre el sòlid roda aquesta no rodi lliscant. Per aquest motiu, a l'hora de fer l'estudi la roda haurà de respectar les equacions següents:

Eq 5: $v = -w \cdot r$

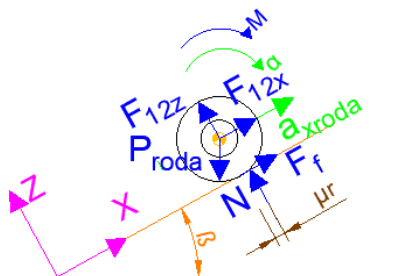
Eq 6: $a = -\alpha \cdot r$

Eq 7: $F_f \leq N \cdot \mu$

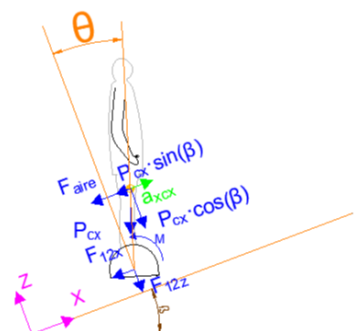
	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 2 Estudis del sistema
	Pàgina: 32 de 119

1.1. Estudi dinàmic en desequilibrar el sistema per accelerar el sistema

A continuació es representen i analitzen les forces que actuen a l'arrancar amb un pendent determinat, amb una inclinació determinada que definirà si s'ha avançar o retrocedir, creant un desequilibri en el sistema que serà contrarestat pels parells de les rodes. D'aquesta manera s'evita que l'usuari acabi caient. Perquè l'usuari sigui capaç de superar el pendent haurà d'inclinar la taula més que en el cas que no hi hagués pendent, per obtenir més potència dels motors i poder seguir endavant. Les forces que interactuen en el pla Z,X sobre el cos roda i el cos xassís conductor estan representades en la il·lustració 13 i 14 respectivament:



Il·lustració 14: vista lateral de la roda arrancant i avançant en pla inclinat



Il·lustració 13: vista lateral del conductor i xassís arrancant i avançant en pla inclinat

Els sistemes d'equacions que governen són les següents:

Sistema 1 roda accelerant

$$\begin{cases} \sum F_{zr} = 0 \\ \sum F_{xr} = a_{xroda} \cdot m_{roda} \\ \sum M_r = \alpha \cdot m_{roda} \end{cases} \begin{cases} N + F_{12z} - P_{roda} \cdot \cos(\beta) = 0 \\ F_f + F_{12x} - P_{roda} \cdot \sin(\beta) = a_{xroda} \cdot m_{roda} \\ -M + F_f \cdot R + N \cdot \mu r = -\alpha \cdot I_{roda} \end{cases}$$

Sistema 2 conductor i xassís accelerant


$$\begin{cases} \sum F_{zcx} = 0 \\ \sum F_{xcx} = a_{xcx} \cdot m_{cx} \\ \sum M_{cx} = 0 \end{cases} \begin{cases} -2 \cdot F_{12z} - P_{cx} \cdot \cos(\beta) = 0 \\ -2 \cdot F_{12x} - P_{cx} \cdot \sin(\beta) = a_{xcx} \cdot m_{cx} \\ 2 \cdot M - 2 \cdot F_{12x} \cdot H \cdot \cos(\theta) + 2 \cdot F_{12z} \cdot H \cdot \sin(\theta) = 0 \end{cases}$$

Incògnites:

$$N, F_{12z}, F_{12x}, M, F_f, a_x, \alpha$$

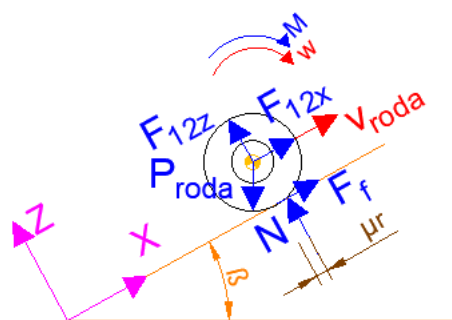
Variable de control:

Modificant aquesta variable θ és possible trobar les incògnites per cada inclinació de l'usuari.

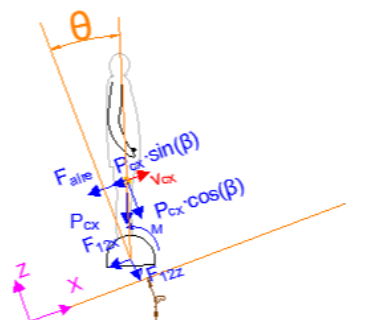
	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 2 Estudis del sistema
	Pàgina: 33 de 119

1.2. Estudi dinàmic en desequilibrar el sistema per assolir una velocitat constant

En aquest cas és representen i analitzen les forces que actuen a l'avançar a velocitat constant amb un pendent determinat, i amb un inclinació determinada per poder avançar o retrocedir. Les forces que interactuen en el pla Z,X sobre el cos roda i el cos conductor xassís estan representades en les il·lustracions 15 i 16 respectivament.



Il·lustració 15: vista lateral de la roda avançant a velocitat constant en pla inclinat



Il·lustració 16: : vista lateral del conductor i xassís avançant a velocitat constant en pla inclinat

Els sistemes d'equacions que governen són les següents:

Sistema 3 roda a velocitat constant

$$\begin{cases} \sum F_{zr} = 0 \\ \sum F_{xr} = 0 \\ \sum M_r = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} N + F_{12z} - P_{roda} \cdot \cos(\beta) = 0 \\ F_f + F_{12x} - P_{roda} \cdot \sin(\beta) = 0 \\ -M + F_f \cdot R + N \cdot \mu r = 0 \end{cases}$$

Sistema 4 conductor i xassís a velocitat constant

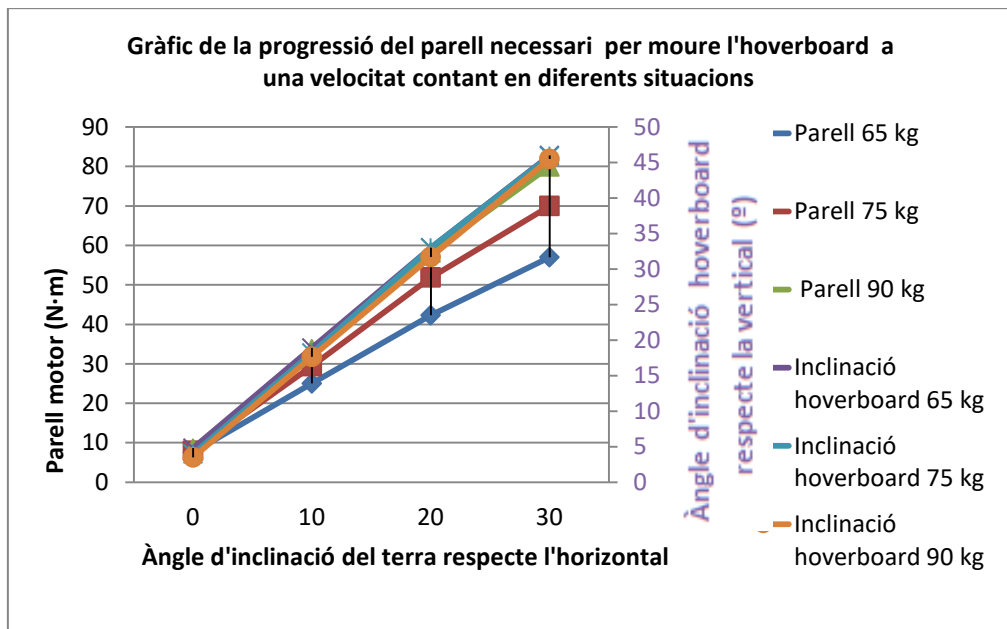
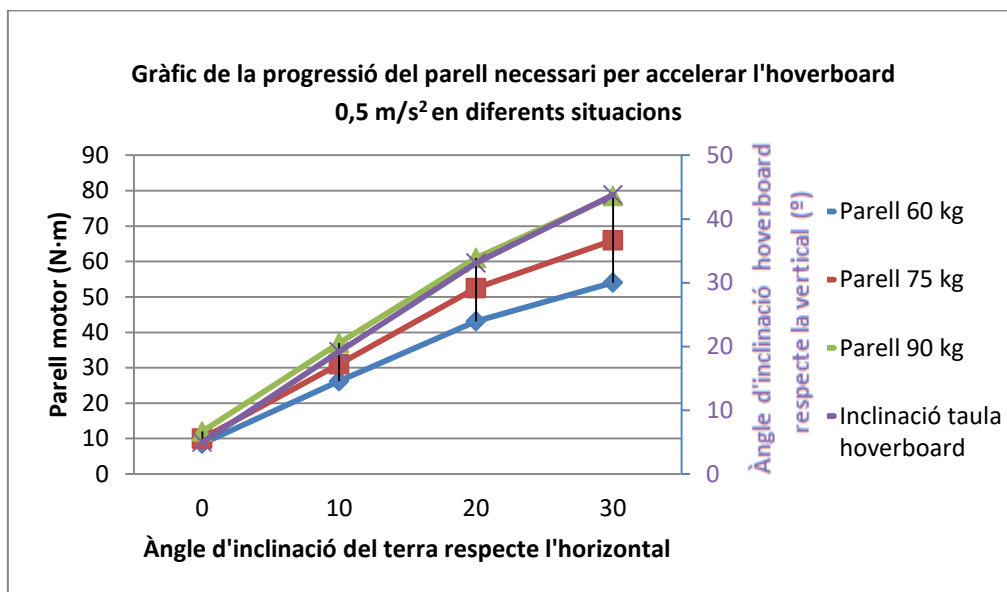
$$\begin{cases} \sum F_{zcx} = 0 \\ \sum F_{xcx} = 0 \\ \sum M_{cx} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} -2 \cdot F_{12z} - P_{cx} \cdot \cos(\beta) = 0 \\ -2 \cdot F_{12x} - P_{cx} \cdot \sin(\beta) - F_d = 0 \\ 2 \cdot M - 2 \cdot F_{12x} \cdot H \cdot \cos(\theta) + 2 \cdot F_{12z} \cdot H \cdot \sin(\theta) = 0 \end{cases}$$


Incògnites:

$$N, F_{12z}, F_{12x}, M, F_f, \theta$$


1.3. Resultats dels estudis dinàmics i cinemàtic

En el segon annex s'han extret en una taula els diferents parells i angles necessaris que s'ha d'inclinar el patí per poder avançar amb els diferents pesos d'usuaris i els pendents possibles. Les dades extretes de les taules del segon annex s'han representat en dos gràfics: un amb una acceleració de $0,5 \text{ m/s}^2$ i un altre a velocitat constant. En els gràfics següents s'han representat la relació entre el parell, l'angle d'inclinació del hoverboard, de l'angle del pendent i el pes.



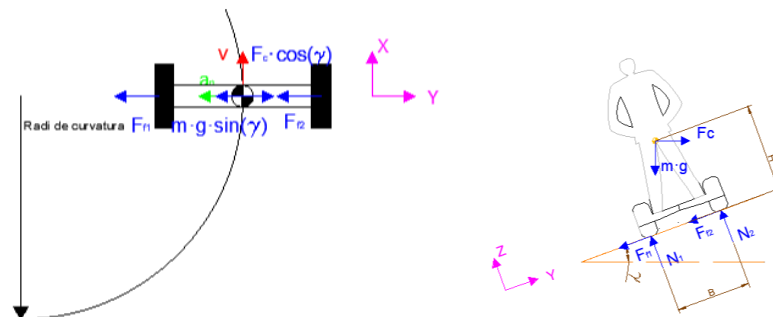
	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 2 Estudis del sistema
	Pàgina: 35 de 119

Aquests resultats són de vital importància a l'hora d'elegir els motors que aniran equipats a les rodes, ja que sense un parell suficient el patí no serà capaç de traslladar la càrrega i molt menys de mantenir l'equilibri. En els resultats es pot apreciar que és necessari un motor capaç de proporcionar un parell de 80 N·m en el punt de treball més desfavorable, per lo tant s'ha d'utilitzar un motor que no requereixi d'una alimentació massa elevada i sigui capaç de proporcionar aquest parell en condicions necessàries i poder avançar a una velocitat moderadament elevada.

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 2 Estudi del sistema
	Pàgina: 36 de 119

1.4. Estudi de les condicions de lliscament i bolcar

A l'hora d'agafar una corba s'ha de vigilar de no anar massa ràpid, ni fer un gir brusc per no lliscar sobre l'asfalt, ni bolcar, ja que sobre el cos actua una força centrífuga, com en la il·lustració 17.



Il·lustració 17: Diagrames del usuari utilitzant el patí donant una corba a velocitat constant

1.4.1. Anàlisis del lliscament

Sistema 5: relació de la normal amb la força de fricció límit.

$$\begin{cases} N_1 \cdot \mu = F_{f1} \\ N_2 \cdot \mu = F_{f2} \end{cases}$$

$$\text{Eq 8: } F_c = m \cdot a_n = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

$$\text{Eq 9: } \sum F_Y \rightarrow F_c \cdot \cos(\gamma) = F_{f1} + F_{f2} + P \cdot \sin(\gamma)$$

$$m \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \cos(\gamma) = \mu \cdot (N_1 + N_2) + m \cdot g \cdot \sin(\gamma)$$

Per Gamma molt petites pràcticament sense peralt s'apliquen les equacions següents:

$$\text{Sistema 6} \begin{cases} \cos(\gamma) = 1 \\ \sin(\gamma) = \gamma \\ m \cdot g = N_1 + N_2 \end{cases}$$

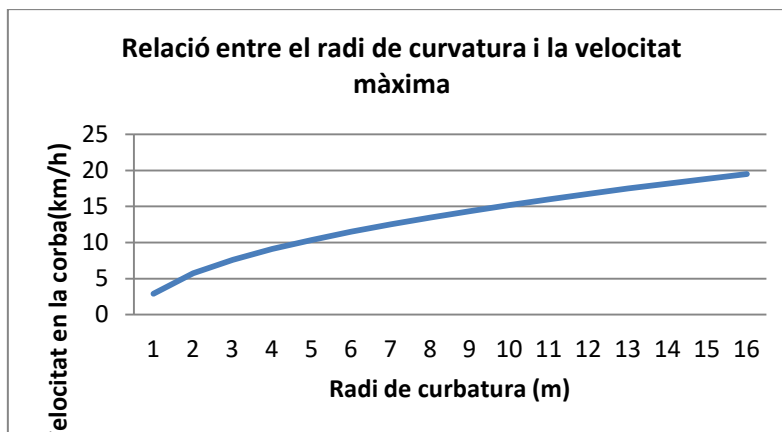
$$\text{Eq 9: } m \cdot \frac{v^2}{R} = \mu \cdot m \cdot g + m \cdot g \cdot \gamma$$

$$m \cdot \frac{v^2}{R} = \mu \cdot g + g \cdot \gamma$$

$$v = \sqrt{r \cdot g \cdot (\mu + \gamma)}$$

De l'expressió anterior es dedueix que la velocitat màxima a l'agafar una corba sense lliscar dependrà directament del radi de curvatura, del coeficient de fricció estàtic i el

peralt. Tenint en compte que s'ha suposat una $\mu = 0,65$ i que no es considera cap peralt, s'ha plantejat uns radis de curvatura per veure la tendència de la velocitat màxima a la que es pot agafar aquesta sense lliscar en el gràfic següent:



1.4.2. Anàlisi per evitar que bolqui

Per saber en quina situació pot bolcar al donar la corba, es farà un sumatori de moments respecte el centre de masses del sistema per determinar el valor i quines variables permetran que bolqui.

$$\text{Eq 10: } \sum M_{cm} \rightarrow \frac{b}{2} \cdot (N_2 - N_1) = h \cdot (F_{f1} + F_{f2})$$

$$\frac{b}{2} \cdot (N_2 - N_1) = h \cdot \mu \cdot (N_1 + N_2)$$

Tenint en compte que quan bolqui la reacció N_1 quedarà anul·lada, la condició de equilibri es deixarà de complir quan:


$$\mu > \frac{b}{2 \cdot h}$$

Per a que no bolqui l'altura del centre de masses no hauria de ser massa gran, ni tenir un gran coeficient de fricció o tenir una distancia entre rodes "b" elevada, que sigui capaç de compensar el efecte de l' h i el coeficient per a que no es compleixi la relació anterior.

Tenint en compte que s'ha utilitzat una $\mu=0,65$ en el anàlisi dinàmic i cinemàtic, les reaccions en les rodes disten de 0,85 m entre elles com marquen els plànols i el centre de masses del conjunt usuari i el patinet es troba a 0,7 m.

$$0,65 > 0,607$$

Per lo tant, per poc aquesta relació evita que el usuari bolqui amb el patí.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 2 Estudis del sistema
	Pàgina: 38 de 119

2. Anàlisi del control

Primerament, es farà l'anàlisi del sistema de control, es començarà especificant les variables que cal monitorar i controlar, quins aparells permetran monitorar aquestes variables, les actuacions que s'hauran de realitzar i quin aparell haurà de fer-ho. També s'inclou un apartat on s'explica el funcionament, des del punt de vista de l'usuari.

2.1. Variables a controlar

- **Inclinació de la taula respecte el terra de la part dreta i esquerra:**

Les taules unides per l'articulació que permeten pivotar poden assolir un angle respecte del terra diferent. Modificant aquesta variable l'usuari és capaç de canviar la velocitat de les rodes independentment una de l'altra, permetent a l'usuari girar. Aquesta variable és directament modificable per l'usuari inclinant les plataformes sota els peus.

- **Velocitat roda de dretes i velocitat roda d'esquerres (v):**

Degut a que les rodes motrius es mouen gracies a un motor que esta unit a cada una, es controla la velocitat de cada roda de manera independent, d'aquesta manera es poden aconseguir sentits i velocitats de girs diferents que permeten canviar de direcció pivotant. Aquesta variable serà modificada a pel microprocessador a través de la relació de intensitat acceleració independent de cada una de les taules del xassís proporcionada pels sensor que s'explicaran a continuació.

2.2. Sensors

Per a que el microprocessador pugui fer un seguiment sobre les variables a controlar necessita uns sensors determinats:

- **Unitat de mesura inercial:** ^[8]

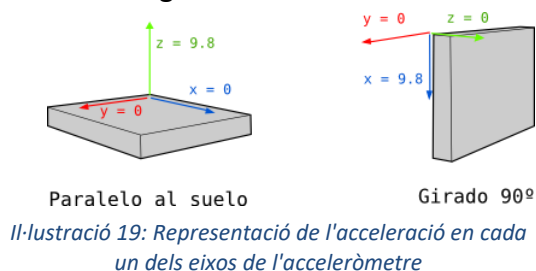
Es tracta d'un dispositiu capaç de mesurar la força (acceleració) i la velocitat. Genèricament consta d'un acceleròmetre i un giroscopi. Per tant: un IMU no mesura angles. Almenys no directament, requereix alguns càlculs. L'unitat de mesura inercial pot ser de 6 graus de llibertat, això vol dir que du incorporat un acceleròmetre i un giroscopi, ambdós de 3 eixos. En aquest cas també porta un magnetòmetre.



Il·lustració 18: Sensor giroscopi, acceleròmetre i magnetòmetre

Acceleròmetre: Es poden utilitzar les lectures de l'acceleròmetre per saber quin és l'angle d'inclinació respecte a l'eix X o l'eix Y. Quan l'IMU estigui perfectament alineada amb la gravetat, com es veu en l'il·lustració 19, l'eix z,

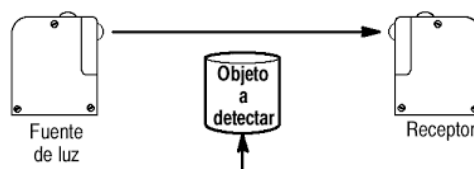
marcarà 9,8, i els altres dos eixos marcaran 0. En canvi, si ara es l'eix X el que està perpendicular al sòl marcarà l'acceleració de la gravetat. Si es sap que la gravetat és de $9,8 \text{ m/s}^2$, i també que es mesura els tres eixos de l'acceleròmetre, per trigonometria és possible calcular l'angle d'inclinació de la IMU. Actualment, ja s'implementa en el càlcul i són capaces de donar el valor absolut de l'orientació en graus.




El giroscopi: mesura la velocitat angular, el nombre de graus que es gira en un segon. La mesura de l'angle, és una combinació de les lectures del giroscopi i del acceleròmetre.

- **Sensor fotoelèctric:**^[9]

El sensor fotoelèctric, també anomenats òptic, basa el seu funcionament en l'emissió d'un feix de llum que és interromput o reflectit per l'objecte a detectar, en altres paraules detecten la presència d'un objecte per mitjà d'un feix de llum. Típicament estan compostos per una font de llum, un receptor de llum, dispositius òptics per guiar el feix de llum (lents) i un circuit de sortida.



Sota cada una de les superfícies sobre els que reposen els peus, hi han dos sensors fotoelèctrics. La llum d'aquells segueix activada quan el usuari manté els peus plans, deixant que la placa lògica sàpiga que no ha de fer funcionar els motors. Quan l'usuari s'inclina cap algun dels dos sentits, una peça, moguda pels coixinets actua com ha interruptors i bloqueja el feix de llum del sensor fotoelèctric com es mostra en la il·lustració 20. En aquest moment el sensor indica a la placa lògica que ha d'activar el controlador PID, per auto equilibrar-se.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 2 Estudis del sistema
	Pàgina: 40 de 119


2.3. Actuadors

El sistema incorporarà un seguit d'accions com a resposta a les dades preses pels sensors que el dispositiu incorpora, ja siguin per dur a terme la funció principal de traslladar l'usuari o com elements de seguretat passiva:

Motors:

La velocitat de cada roda va lligada a la inclinació que es dona a cada plataforma del pati on descansen els peus, com a major inclinació major serà el parell que transmetrà a les rodes i per tant a major velocitat giraran els motors. Si la taula té una gran horitzontalitat, és frenarà fins a parar els motors.

El motor elèctric elegit per fer moure les rodes és un motor brushless, degut a la gran eficiència d'aquests. Unes avantatges clares és la commutació electrònica basada en sensors de posició de l'efecte Halls. Degut a que les escombretes no són necessàries el manteniment és més baix, la durabilitat és major, amb una alta i potència. A més a més, gràcies a l'absència de calor provocada per les escombretes, aquests motors presenten menors pèrdues d'energia que es poden enllaçar a un menor consum.

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 2 Estudis del sistema
	Pàgina: 41 de 119

2.4. Funcionament del desplaçament del dispositiu

Aquest patinet com té la finalitat de transportar a persones ha de ser simple d'utilitzar e intuïtiu. ^[10] A continuació s'explicaran els diferents moviments del patí i l'actuació de l'usuari al realitzar-lo.

Pujar : Primer s'ha de pujar un peu i després l'altre per a evitar que s'activi l'aparell i avanci. Al detectar que puja algú el microprocessador no activarà els motors en seguida, sinó en uns segons més tard.

Avançar: Inclinant els dos costats de la taula endavant o avançant el pes lleugerament endavant, d'aquesta manera s'activen els infrarojos davanters a la vegada que es canvia l'angle dels giroscopis, al detectar la inclinació del pati s'alimentaran els dos motors amb el corrent necessari per avançar a la vegada i amb més o menys velocitat depenen de la inclinació, per tal de mantenir l'equilibri.


Retrocedir: inclinant els dos costats de la taula enrere o retrocedint el pes enrere, d'aquesta manera s'activen els infrarojos posteriors , al detectar aquesta inclinació el pati activarà els dos motors per retrocedir a la vegada i amb més o menys velocitat depenent de la inclinació.

Girar: Hi han dues maneres amb moviment o pivotant.

En moviment: Quan s'estigui en moviment, el peu que s'inclini més farà que el motor de la roda giri més ràpid, per lo tant farà que l'aparell giri cap al costat contrari del peu que gira més ràpid.

Pivotant: inclinant el peu esquerra endavant i peu dret enrere es girarà a dretes, en canvi amb el peu esquerra enrere o el peu dret es girarà cap a l'esquerra.

Les velocitats de gir dels motors venen determinades per la velocitat màxima de 30 km/h a la que es limitarà el dispositiu. Per lo tant la velocitat màxima a la que giraran els motors són 32,47 rad/s.

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 2 Estudis del sistema
	Pàgina: 42 de 119

3. Components indispensables en l' hoverboard

A continuació es detallaran els components bàsics, essencials que utilitza el dispositiu ha dissenyar.

- **Xassís:** Sobre el xassís anirà muntat els diferents sensor, actuadors, processadors i bateries. Es la part que permet a l'usuari inclinar el costat dret i el esquerra independentment, per a tenir un control de la direcció de l'aparell i poder gira tant a dretes, com esquerres, o anar davant i enrere. Aquest xassís normalment es d'acer, però una forma de disminuir el pes d'aquest sense perdre resistència és que sigui fabricat d'alumini.

Les mesures principals del xassís com l'amplada diàmetres etc estan incloses en els plànols degut que els xassís utilitzats fins ara son massa petits per a que s'instal·lin sobre d'aquest tots els components necessaris per complir amb els requeriments. Aquest xassís haurà d'incorporar un boló en l'articulació amb uns coixinets per facilitar la rotació.



Il·lustració 21: Xassís amb pivotat-ge

- **Articulació:** el xassís ha de ser fabricat per a que ell mateix limiti el joc d'inclinar la taula, a més a més un eix suportarà les carregues d'unió.
- **Unions roscades:** en la unió dels components als xassís com poden ser les rodes, la carcassa o els diferents suports. S'utilitzaran cargols de mètriques diferents segons les carregues a suportar.
- **Motors (brushless)**^{[11][12]}: La majoria de motor emprats en hoverboard estan ubicats en l'interior de la roda. Aquets motors utilitzen la llanta en la que estan ubicats com a rotor, amb imants permanent i l'estator fix al xassís. Aquets motors poden incloure una reducció la qual permet disminuir el pes, la velocitat i augmentar el parell de sortida. Degut a la reducció és possible reduir el pes fins un 50% amb el mateix parell de torsió, però amb un augment de soroll dels engranatges. En aquets tipus de motors elèctrics és possible incorporar un fre regeneratiu, per tal de poder allargar l'autonomia de les

bateries .El fre regeneratiu és un dispositiu que dona la possibilitat de reduir la velocitat d'un vehicle transformant part de la seva energia cinètica en energia elèctrica.



Il·lustració 22: Motor brushless Gearless



Il·lustració 23: Motor brushless Geared

- **Pneumàtics:** Són el punt de contacte amb el terra, degut a que no s'utilitzaran amortidors s'han d'elegir unes rodes lo suficientment grans, per suavitzar les irregularitats que poden arribar haver en el terreny. Les rodes més comuns són de 6.5", 8" i 10". Per tan, encara que sigui necessari una menor força motriu per moure una roda petita, en aquest dispositiu es muntaran les rodes de 12 polsades sobre motors de 10 polzades, degut a que els motors de cub d'alt parell tendeixen a ser massa grans. Com a conseqüència és fa possible amortir petites alteracions de terreny com anteriorment s'ha mencionat.



Il·lustració 24: Diferents dimensions de roda

- **Sensor fotoelèctric^[10]:** Un fotointerruptor és un fotosensor de tipus transmissió, que generalment consisteix en elements emissors de llum i elements receptors de llum alineats entre si en un sol paquet, que funciona en detectar el bloqueig de la llum quan un objecte objectiu es troba entre els dos elements, actuant com un interruptor òptic. A diferència dels interruptors mecànics, els fotointerruptors són interruptors sense contacte (òptics), que milloren la fiabilitat en evitar el desgast a causa de l'abrasió (contacte).

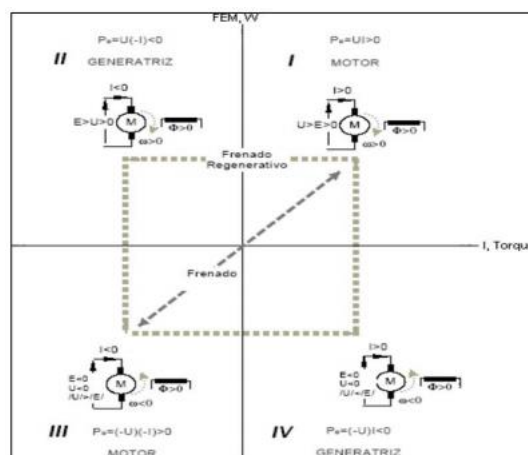


Il·lustració 25: Sensor FC-03

Aquets sensors s'utilitzaran com a sensors de seguretat, serviran per verificar si la inclinació detectada pel giroscopi s'ha de traduir en moviment o no. Aquest sensor es molt útil per evitar moviments involuntaris. Serveix per saber quan puja algú, quins peus hi han damunt la taula per saber quan avançar.

- **Unitat de mesura inercial**^[13]: Aquest dispositiu incorpora un acceleròmetre i un giroscopi, perquè hi ha dos tipus de forces que poden ser útils de mesurar, les d'empenta lateral pel vent a ratxes per exemple, i a l'hora d'inclinar la taula simularà un accelerador i un fre a cada peu, depenent de si l'usuari inclina aquest endavant o enrere. En la mateixa placa de l'unitat de mesura inercial s'incorporaran dos sensor fotoelèctrics, un davant i un altre a darrera de cada taula per corroborar que l'usuari desitja mobilitzar-se en aquella direcció.
- **Sistema ESC**^[14]: Unitat indispensable per alimentar el motor a una tensió molt més elevada que la que pot proporcionar el microprocessador, ja que substitueix al circuit de transistors que commutant alimenta el debanat del motor correctament. A més a més aquesta unitat electrònica és capaç de variar el sentit del corrent per recarregar les bateries, el procés de regeneració és totalment automàtic i es produeix quan la velocitat real del motor supera la velocitat de demanda segons el microprocessador. Quan això passa, la FEM posterior del motor és superior a la tensió de sortida del controlador, de manera que el corrent flueix des del motor, a través del controlador i torna a entrar a la bateria.

El fre regeneratiu permet reduir la velocitat d'un vehicle transformant part de la seva energia cinètica en energia elèctrica. Es basa en el principi que un motor elèctric pot ser utilitzat com a generador. Els estats de funcionament d'un motor DC es poden representar gràficament com es mostra en la següent Il·lustració 26:




Il·lustració 26: Estats de funcionament d'un motor brushless

Com es pot observar, s'utilitza un sistema de coordenades en el qual l'eix vertical representa la f.e.m. i en l'eix horitzontal el corrent induït. com la f.e.m. és proporcional a la velocitat, l'eix vertical també serà de velocitats. De la mateixa manera, el parell es representa en l'eix horitzontal perquè és proporcional al corrent.

Aquests dos paràmetres defineixen el punt de funcionament del motor en un els quatre quadrants.

1. En els quadrants I i III, el producte f.e.m. per intensitat és positiu, per tant la potència és positiva i el motor està absorbint energia elèctrica per convertir-la en energia mecànica, és a dir, s'està comportant com a motor.
2. En els quadrants II i IV, el producte és negatiu pel que la màquina retorna energia elèctrica, és a dir, es comporta com a generador i l'ESC inverteix el senyal.

- **Main board o microprocessador:** Es el cervell de l'aparell, el qual raona cada reacció d'aquest segons la informació que li arriben dels diferents sensors i activa els actuadors corresponents a cada resposta, enviant diferents senyals. En l'actual projecte la mainboard emprada serà un Arduino, degut a la gran versatilitat d'aquest.
- **Leds i/o pantalla :** Poden servir per donar un codi d>alertes, per indicar si l'aparell està encès, apagat, carregant o girant. La codificació per leds permet transmetre informació a través de llums de diferents colors que decidirà el programador.
- **Bateria** ^[15] ^[16]: Hi han dos tipologies de bateries degut als materials amb els quals han estat fabricades, és molt importat elegir-la correctament, pensant en l'aplicació.
 Una tipologia de bateries són les d'un sol ús, les primàries, aquestes bateries poden estar fabricades amb Zinc-Carbó o poden ser alcalines. Un exemple de bateries primàries serien les piles del comandament a distància del televisor.
 Un altre tipus de bateries són les secundaries, les quals són recarregables. Aquestes bateries poden estar fabricades amb Plom-Àcid, àcid sulfúric immobilitzat, etc. Hi han diferents tipologies dintre de les bateries recarregables: les bateries de gel, les de fibra de vidre i les de cel·les seques entre les quals destaquen les fabricades amb ió de liti, per la seva potència i baix pes en comparació a les altres encara que és de les més cares entre les cel·les seques. Aquestes últimes són les adequades per al vehicle que es vol fabricar.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 3 Disseny
	Pàgina: 46 de 119

Capítol 3 Disseny

1. Components fonamentals elegits

Per al desenvolupament del prototip hi ha una sèrie de components fonamentals, com es veu en l'esquema general de la il·lustració 31 d'aquest capítol: bateria, motor, sistema ESC i microprocessador. Però apart d'aquets components electrònics hi han un sèrie de elements estructurals que s'han d'elegir amb bon criteri per a que el patí tingui la vida útil desitjada, com bé són: els coixinets de fricció, el xassís, el boló de l'articulació o els cargols que uneixen el xassís a les rodes.

Sense un bon dimensionament d'aquets elements el patí és molt possible que es trenqui per algun punt d'unió o per l'estructura (Xassís).

1.1. Components electrònics

En aquest apartat es mostraran els components electrònics elegits per a la construcció del patí, amb les característiques pròpies de cadascú, les quals fan imprescindibles que siguin aquests els components i no uns altres.


1.1.1. Unitat de mesura inercial ^{[17][18]}

Cal tenir una bona percepció de l' inclinació, per tal que la senyal d'entrada al controlador PID. Per lo tant s'ha elegit el sensor inercial absolut 9DOF BNO055. Aquest utilitza una combinació de acceleròmetre, giroscopi i magnetòmetre, però el difícil d'això és realitzar els càlculs necessaris amb matrius i nombre complexos i això pot arribar força temps implementar i no sempre s'aconsegueix una precisió adequada. Aquesta placa basada en components específics de BOSH soluciona aquest problema i calcula de forma absoluta els angles, velocitats i acceleracions de tots els eixos.

El BNO055 és un sensor que inclou tots els sensors necessaris amb compensació de temperatura així com un potent microprocessador ARM Cortex-M0 que processa i realitza tots els càlculs matemàtics, tot això en un sol xip. A la sortida s'obtenen els valors precalculats dels angles que ens interessen amb una ràti d'actualització de fins a 100 Hz.

El BNO055 té les següents sortides de dades:

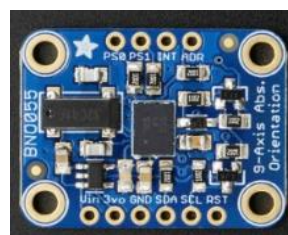
- Orientació absoluta (vector de Euler, 100Hz) Dades d'orientació de tres eixos basades en una esfera de 360 °.
- Orientació absoluta (Quaternion, 100Hz) Sortida de quaternions de quatre punts per a una manipulació de dades més precisa.
- Vector de velocitat angular (100Hz) Tres eixos de "*velocitat de rotació*" en rad/s.

 <div> Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior </div>	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 3 Disseny
	Pàgina: 47 de 119

- Vector d'acceleració (100Hz) Tres eixos d'acceleració (gravetat + moviment lineal) en m/s^2 .
- Força de camp magnètic Vector (20 Hz) Tres eixos de detecció de camp magnètic en micro Tesla (uT).
- Vector lineal d'acceleració (100Hz) Dades d'acceleració lineal de tres eixos (acceleració menys gravetat) en m/s^2 .
- Gravity Vector (100Hz) Tres eixos d'acceleració gravitacional (menys qualsevol moviment) en m/s^2 .
- Temperatura (1Hz) Temperatura ambient en graus centígrads.

En el BNO055 és faran les següents connexions amb els pins:

- Alimentació a 5v
- GND
- Comunicació I2C (Arduino):
SDA (Línea de dades)
SCL (Línea de rellotge)



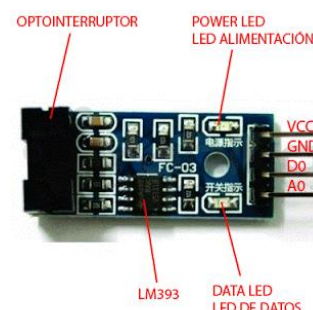
Il·lustració 27: Pin outs IMU BNO055

1.1.2. Sensor fotoelèctric ^[19]


Els interruptor òptics que s'activen amb els coixinets on reposen els peus, al activar-los emet un senyal digital el qual es interpretat per l'Arduino per a que enviï una resposta mentre aquest sensor esta activat.

S'ha elegit el FC-03 degut a que es compatible amb l'Arduino i té els pin outs següents:

- V_{CC} : Alimentació a 5v
- GND: Terra
- D_o : Digital output, la qual permet informar al microprocessador si està activat o no.
- A_o : Analog output la qual no es connectarà, ja que aquesta dada és prescindible.



Il·lustració 28: Pin out FC-03

 <div> Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior </div>	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 3 Disseny
	Pàgina: 48 de 119

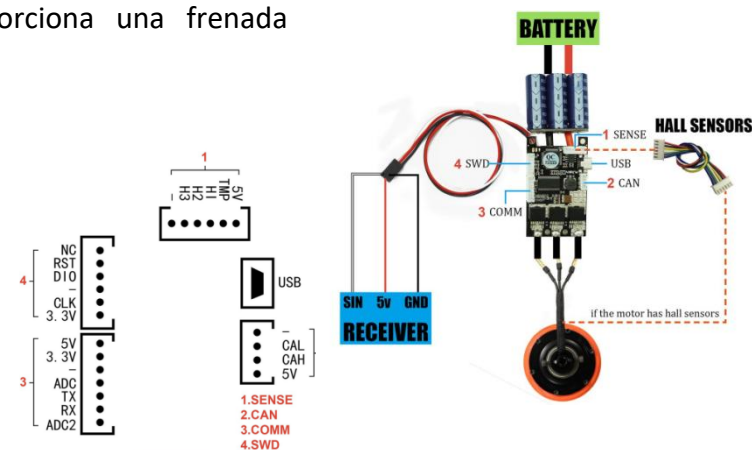
1.1.3. Control electrònic de velocitat ^[20]

De tots els ESC que hi han al mercat s'ha elegit el Flipsky ESC ja que es basa en el projecte de codi obert ESC i compatible amb aquest programari, és un controlador de velocitat Electronic altament modificable dissenyat i pensar per patins elèctrics. Permet utilitzar motors sense sensors halls per aconseguir una bona arrencada des d'una parada, encara que també permet connectar els sensors halls que pot incorporar el motor opcionalment, mentre que els tradicionals RC esc poden tenir problemes en l'arrencada. A més a més proporciona una frenada elèctrica fiable i progressiva.

- Especificacions Flipsky ESC:
- Voltatge: 8V-60V
- Corrent: 50A continu / 240A pico
- Freqüència: entrada PWM
- BEC: Alimentació Arduino i

resta de sensors 5V 1.5A

- Freqüència regenerativa.
- Interfície de control del motor: senyal PPM (servo RC), analògic, UART, I2C, USB o CAN-bus .



Il·lustració 29: Diagrama de connexió dels diferents ports del ESC Flipsky amb el motor i el microprocessador

1.1.4. Motor hub (Brushless) ^{[21] [22] [23]}

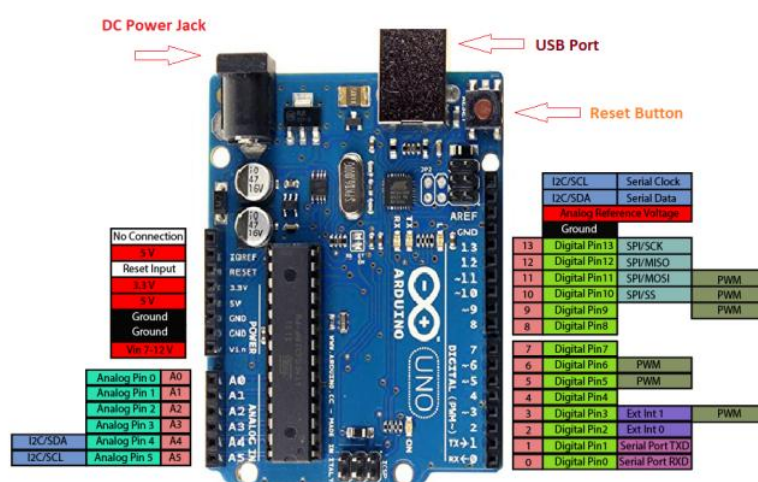
S'ha elegit un motor pesat de 7 kg, però potent per complir amb el requeriment sense cap problema. Un QSmotor de 10 polsades, de voltatge variable de 48,72 i 96, capaç de proporcionar un parell de 90 N·m amb 48v. La bateria hauria de descarregar-se a 33 - 35A. A l'hora de programar el prototip un cop reunits tots els components s'haurà d'observar la gràfic proporcionada pel fabricant per obtenir el parell necessari amb cada inclinació del patí.

1.1.5. Bateria ^[24]

La bateria a utilitzar és una bateria de liti, degut a la relació pes capacitat. La font alimentarà a 48v els motors, amb una capacitat de carrega de 40 Ah. Però per estabilitzar el centre de masses del patí és dividiran en dues bateries de 24v i 20 Ah, pesant kg per bateria. Aquestes dues es connectaran en sèrie per aconseguir el voltatge adequat. La capacitat de descarrega de les mateixes és de entre 20A- 40A, per tant es suficient per alimentar el motor.

1.1.6. Arduino UNO

Per assegurar una bona comunicació amb els sensors s'ha elegit l'Arduino Uno, que és un dels microprocessadors de la marca més versàtils i econòmics. En la il·lustració 30 s'observen els diferents pins d'entrades i sortides d'aquest microprocessador, com poden ser les entrades analògiques, digitals, senyals de polsos que pot enviar l'Arduino i diferents busos d'intercanvi de dades.



Il·lustració 30: Pin outs del Arduino UNO 2560

Un dels motius principals pel qual s'ha escollit aquest microprocessador és la varietat de pins que té, proporcionalment amb la mida d'aquest. Degut a que el model dissenyat incorporarà dues bateries els altres elements hauran d'optimitzar el espai sobra'n dins la carcassa.

1.1.7. Altres

Aquets components poden ser útils una vegada el vehicle ja es funcional però no influeixen en cap actuació indispensable per du a terme el objectiu de desplaçar-se i establitzar-se, aquets instruments pretenen transmetre una informació.

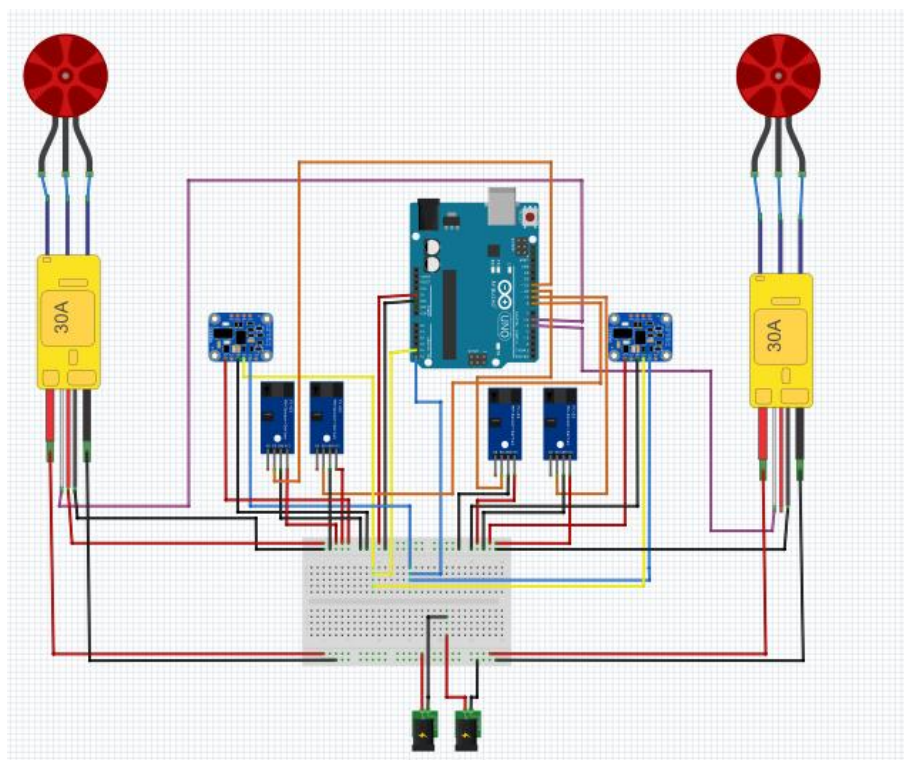
Com poden ser la pantalla LCD, com a display de la velocitat i de l'autonomia del vehicle, i les llums Led tan les de posició, com les de encès, les de carregant i bateria baixa.

1.1.8. Esquema lògic de comunicació del sistema


En la il·lustració mostrada a continuació, es representa la comunicació entre els diferents components electrònics que s'han incorporat per fer possible l'equilibri i el funcionament del patinet.

S'ha col·locat en el centre de la il·lustració la placa de l'Arduino UNO, sota del microprocessador s'ha ubicat una Protoboard per fer més còmodes les diferents connexions amb diferents voltatges i sota d'aquesta la font d'alimentació. Als laterals de l'Arduino s'han connectat 2 tipologies de sensors, un encoder i l'altre giroscopi, i el ESC amb el motor respectiu.

El cablejat simbolitzat amb negre és el terra, el roig de la part de dalt de la Protoboard està alimentat a 5v i el de la part de baix probe de les fonts d'alimentació connectades en sèrie per poder alimentar els motors. El cablejat taronja és la senyal digital que emet el foto interruptor. El giroscopi per tal de comunicar-se amb l'Arduino requereix de dos cables el blau (SCL) i el groc (SDA), que es connecten al mateix Pin degut a que és un bus de dades comunicar-se amb els dos giroscopi pel mateix pin. Per altra banda el cable morat permet a l'Arduino enviar una senyal PWM al ESC per tal d'alimentar les diferents fases dels motors i per millorar la fiabilitat d'aquests podria ser necessari que es connectessin els sensors d'efecte Halls que poden incorporar els motors elegits al ESC elegit, degut a que te un port per fer-ho.



Il·lustració 31: comunicació entre els sensors, actuadors i el microprocessadors amb les diferents connexions dels pin.

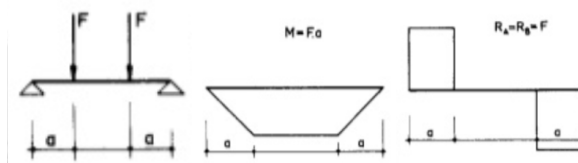
	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 3 Disseny
	Pàgina: 51 de 119

1.2. Components estructurals

El resultat final per una part haurà de funcionar, però per altra ha de ser segur d'utilitzar, per aquest motiu s'han de calcular els punts més crítics de l'estructura. Aquests seran el boló en l'articulació amb els coixinets respectius, la unió entre la roda i el xassís mitjançant cargols i la placa d'alumini haurà de ser lo suficientment resistent per resistir la carrega. En aquest apartat és pretén dimensionar aquets.

1.2.1. Xassís com a estructura

L'hoverboard s'ha dimensionat com una biga recolzada pels dos extrems a una distància de 850 mm, impedit el moviment vertical com en la il·lustració 32. El moment màxim al qual la biga pot està sotmesa s'obtindrà del punt més alt del diagrama de moments flectors sobre el xassís, provocats per una persona de 90kg més la massa del patinet que pot arribar a pesar 20 kg extres. Les forces F vindran donades per la repartició del pes de l'usuari entre les dues. Tenint en compte que la longitud de la biga és molt més gran que la longitud la tensió provocada pel esforç tallant és insignificant en front la tensió del moment flector.

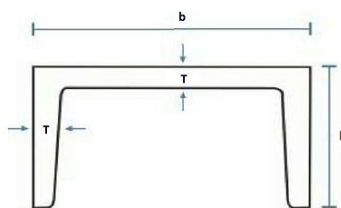


Il·lustració 32: Representació de les carregues estàtiques en el pati amb diagrama de moment i tallant


Per lo tant el moment màxim es calcularà mitjançant l'equació del moment flector màxim, que apareix en la il·lustració 32. En aquesta equació "a" vindrà donat per la longitud total entre 3 per tal de simplificar els càlculs.

$$Eq\ 11: M_{max} = \left(massa_{max} \cdot \frac{g}{2} \right) \cdot a = \left(120 \cdot \frac{9,81}{2} \right) \cdot \frac{850}{3} = 166770\ N \cdot mm$$

Les dues peces que roten entorn l'articulació s'han simplificat com si es tractessin d'una biga UPN, ja que és molt més realista aquesta representació del xassís que una biga quadrada. En la següent il·lustració es representa el perfil d'aquesta. Les cotes b, h i T tenen els valor 287mm, 25mm i 5mm respectivament.



Il·lustració 33: Perfil UPN representant la secció del pati

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 3 Disseny
	Pàgina: 52 de 119

Un cop calculat el centre de masses d'aquesta per ubicar la fibra neutra i el moment d'inèrcia que ha donat com a resultat $37083,62 \text{ mm}^4$. S'ha de comprovar la tensió en el punt més desfavorable que és 4 mm respecte la part superior de la peça a tracció i 21 mm a compressió, mitjançant la equació següent:


$$Eq \ 12: \sigma_{flector} = \frac{M_{max}}{I_z} \cdot y$$

La tensió de compressió i la tensió de tracció màximes que suportarà la peça són de 18 N/mm^2 i $94,44 \text{ N/mm}^2$ respectivament.

Aquestes tensió són adequades a l'hora de fer el disseny, degut a que no superen la tensió màxima admissible per aquest aliatge d'alumini silici elegit, el qual és un aliatge per emmotllament d'alumini i amb silici. A continuació s'adjunten les dades d'aquest en la il·lustració 34.

Propietats mecàniques			
Emmotllament			S
Tractament			F
Resistència tracció	MPa	150	
Limit elàstic	MPa	70	
Allargament	%	5	
Limit de fatiga	$5 \cdot 10^6$ MPa	50	
Duresa	HB	50	
Mòdul d'elasticitat	GPa	75,0	
Coefficient de Poisson	-	0,33	

Il·lustració 34 Propietats mecàniques del aliatge d'alumini i silici extretes del llibre Disseny de maquines IV Selecció de materials 2

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 3 Disseny
	Pàgina: 53 de 119

1.2.2. Eix de l'articulació

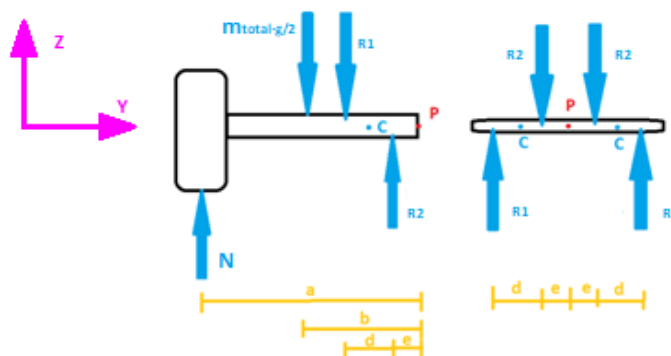
En l'articulació de les dues parts que conformen el xassís, la peça que s'encarrega d'unir aquestes dues és un boló perforat. Per facilitar el lliscament relatiu entre les dues superfícies aquest boló utilitza uns coixinets que mesuren "d" d'amplada, per fixar els coixinets s'utilitzaran uns separadors de "e" d'amplada.

1.2.2.1. Comprovació de la resistència de l'articulació

Primerament s'han d'analitzar en detall les forces a les que aquest es sotmès, s'analitzarà la meitat del pati, es a dir una part del xassís i la meitat del boló. Aquest boló està sotmès a unes forces representades en la il·lustració 35. L'eix ha d'estar foradat per tal de que puguin passar cables a través d'aquest i tenir connectats els components als dos costats del xassís.

La reacció normal en la roda serà del mateix valor però en sentit oposat que la força del pes sobre una de les parts del xassís, $N = m_{total} \cdot \frac{g}{2}$, com s'ha calculat en l'apartat anterior.

Les forces d'enllaç de l'articulació del boló han de generar un parell que contraresti el parell creat pel pes de l'usuari i la força normal entre la roda i el terra. Degut al principi d'acció reacció les reaccions R1 i R2 tindran el sentit contrari.




Il·lustració 35 Diagrames sòlid lliures meitat del xassís i boló

Aplicant la segona llei de Newton en el sòlid meitat del xassís s'observa que les forces en els coixinets són del mateix valor però de sentits oposats, ja que la normal s'anul·la amb la meitat del pes total.

$$Eq\ 13: \sum F_z = 0 \rightarrow N - m_{total} \cdot \frac{g}{2} + R_2 - R_1 = 0$$

per lo tant:

$$R_2 = R_1$$

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 3 Disseny
	Pàgina: 54 de 119

Per altra banda fem un sumatori de moments respecte el punt P en el sòlid lliure meitat del xassís s'obté el valor F_2 .

$$Eq\ 14: \sum M_p = 0 \rightarrow N \cdot a - m_{total} \cdot \frac{g}{2} \cdot b - R_1 \cdot (d + e) + R_2 \cdot e = 0$$

$$\sum M_p = 0 \rightarrow m_{total} \cdot \frac{g}{2} \cdot (a - b) - R_1 \cdot d = 0$$

$$R_1 = \frac{m_{total} \cdot \frac{g}{2} \cdot (a - b)}{d}$$

Mesures de l'eix i constants a substituir:

$$F_1 = \frac{(massa\ usuari + massa\ patí) \cdot gravetat}{2} = \frac{(90kg + 30kg) \cdot 9.81\ m/s^2}{2} = 588,6\ N$$

$$a = 425\ mm$$

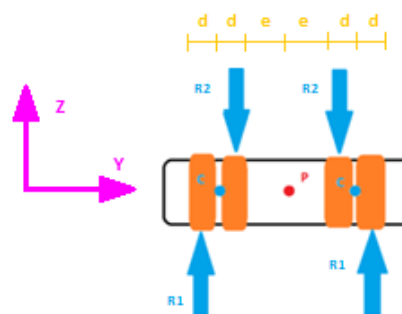
$$b = 141,67\ mm$$

$$e = 20\ mm$$

$$D_{in} = 15\ mm$$

$$D_{ext} = 30\ mm$$

$$d\ "amplada\ dels\ coixinets" = 20\ mm$$




Il·lustració 36: Eix i coixinets de l'articulació

Del sumatori de moments respecte de P s'obté R_1 de 8338,4 N.

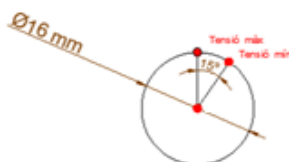
En la il·lustració 36 s'observen les forces que actuen sobre l'eix, aquestes creen el mateix diagrama de moments flectors i tallants que en la il·lustració 32, modificant la F per R_2 i la "a" de la il·lustració per la "d". Dels diagrames es pot determinar el punt més desfavorable, on s'aplica R_2 , aquests punts sofriran el efecte del moment flector màxim i el moment tallant, per lo tant les seccions d'aquests punts seran les més desfavorables.

$$Eq\ 15: M_{max} = (F) \cdot a = (8338,4) \cdot 20 = 166768\ N \cdot mm$$

El centre de masses de la secció està situat en el centre, d'aquesta manera es pot ubicar la fibra neutra i aclarir que el valor de la tensió del moment flector a compressió i a tracció tindran el mateix valor, degut a que les posicions més desfavorable de les dues disten igual de la fibra neutra. A més a més, s'ha calculat el moment d'inèrcia que dona com a resultat $596411,73\ mm^4$, per procedir a calcular la tensió provocada pel moment flector màxim i mínim, amb l'equació 15. Utilitzant el radi exterior per calcular

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 3 Disseny
	Pàgina: 55 de 119

el flector màxim i el radi exterior multiplicat pel cosinus de la meitat del angle de 30º que pot pivotar el xassís s'utilitza per calcular el efecte del flector mínim, com es mostra en la il·lustració 37.



Il·lustració 37: Punts de l'eix amb tensions màximes i mínimes

$$\text{Eq 16: } \sigma_{flector\ màx} = \frac{M_{max}}{I_z} \cdot R_{ext\ eix\ xassís}$$

$$\sigma_{flector\ màx} = \frac{166768\ N/mm}{596411,73\ mm^4} \cdot \frac{30}{2}\ mm = 4,19\ N/mm^2$$

$$\text{Eq 17: } \sigma_{flector\ mín} = \frac{M_{max}}{I_z} \cdot R_{ext\ eix\ xassís} \cdot \cos(15)$$

$$\sigma_{flector\ mín} = \frac{166768\ \frac{N}{mm}}{596411,73\ mm^4} \cdot \frac{30}{2} \cdot \cos(15)\ mm = 4,05\ N/mm^2$$

Per calcular l'esforç tallant es té en compte la geometria de l'eix, un cilindre de 30 mm de diàmetre amb un forat 15 mm de diàmetre, com es pot veure en la il·lustració 36 l'àrea de la secció de l'eix és:

$$\text{Eq 18: } At = \pi \cdot \frac{D_{ext}^2 - D_{in}^2}{4} = 530,1\ mm^2$$

Per tant, segons l'equació 18 l'esforç tallant s'obtindrà del quocient entre la força i la secció.

$$\text{Eq 19: } \tau_{tallant} = \frac{Força\ tallant}{At} = \frac{8338,4\ N}{530,1\ mm^2} = 15,73\ N/mm^2$$

Un cop s'obté σ_m i $\tau_{tallant}$, mitjançant l'equació següent de Von Misses s'obtindrà la tensió de l'efecte màxim de les dues tensions combinades. La qual no pot ser superior comparada amb el valor de la tensió admissible del material. A més a més, variant la tensió del flector segons si és màxima o mínima s'obtenen els valors màxim i mínims de la tensió equivalent:

$$\text{Eq 20: } \sigma_{eq\ màx} = \sqrt{\sigma_{flector\ màx}^2 + 3 \cdot \tau_{tallant}^2} = 27,56\ N/mm^2$$

$$Eq\ 21: \sigma_{eq\ min} = \sqrt{\theta_{flector\ min}^2 + 3 \cdot \tau_{tallant}^2} = 27,54\text{N/mm}^2$$

En aquest cas degut a que la tensió equivalent màxima dista bastant de la tensió a tracció màxima admissible de l'acer seleccionat, el qual es poden veure les seves característiques en la següent il·lustració, és conclou que l'eix aguanta les carregues estàtiques.

UNE 36.016-89	X20Cr13
	F-3402
DIN	1.4021
AISI	420

Composició química			
Carboni	C	%	0,17÷0,23
Crom	Cr	%	12,0÷14,0
Molibdè	Mo	%	-
Niquel	Ni	%	≤ 1,0
Altres		%	-

Propietats físiques			
Densitat	Mg/m ³		7,78
Dilatació tèrmica	(1) μm/m·K		10,3
Calor específic	J/kg·K		460
Conductivitat tèrmica	(2) W/m·K		24,9
Resistivitat elèctrica	nΩ·m		550

Propietats mecàniques			
Resistència tracció	(3)	MPa	≤740
	(4)	MPa	650÷850
Límit elàstic (0,2%)	(3)	Mpa	430
	(4)	MPa	500÷550
	(5)	MPa	400
	(6)	MPa	305/-
Allargament ruptura	(7)	%	25/13
Límit de fatiga		MPa	300
Duresa	(7)	HB	≤225/275
Resiliència KV		J	-
Mòdul d'elasticitat		GPa	220
Coefficient de Poisson		-	0.3

Il·lustració 38: Propietats del Acer inoxidable del que està fabricat l'eix

1.2.2.2. Estudi de ruptura per efecte de la fatiga.

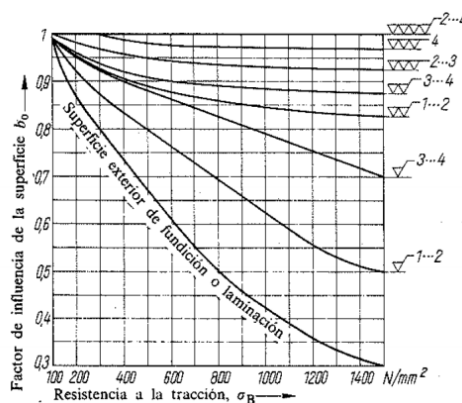
Per calcular la resistència a fatiga de l'eix es parteix de la següent equació:

$$Eq\ 22: \sigma_G = \frac{(\sigma_w \cdot b_0)}{\beta_{kb} \cdot (1 - R_g)}$$

On la σ_w és el límit a fatiga del material, la σ_G la tensió límit de la secció transversal de l'eix. Seguidament, es procedeix a trobar el altres factors de l'equació:

Degut a que és un eix llis el coeficient d'entalladura és $\beta_{kb} = 1$.

El coeficient d'influència, b_0 s'extreu de la gràfica següent on coincideix amb la resistència a tracció dels acers σ_B :



Il·lustració 39: Gràfica del factor de influència de la superfície

La resistència a tracció es de 650 N/mm^2 , sobre la corba de la superfície exterior de forja o laminació dona un valor $b_0 = 0,55$.

El grau de repòs, R , es calcula de la següent manera:

$$\text{Eq 23: } R_g = \frac{\sigma_m}{\sigma_0}$$

On σ_m és la tensió mitja del cicle de carrega que es calcula:

$$\text{Eq 24: } \sigma_m = 0,5 \cdot (\sigma_{m\max} + \sigma_{m\min}) = 0,5 \cdot (27,56 + 27,54) = 27,55 \text{ N/mm}^2$$

On σ_0 és la tensió superior del cicle de carrega que es calcula:

$$\sigma_0 = \sigma_{m\max} = 29,18 \text{ N/mm}^2$$

$$R_g = \frac{27,55}{29,18} = 0,944$$

Un cop aconseguit els valors dels factors de fatiga amb l'equació 22 es calcula σ_G :

$$\sigma_G = \frac{300 \cdot 0,55}{1 \cdot (1 - 0,944)} = 165000 \text{ N/mm}^2$$

Aquest valor de σ_G s'ha de dividir per un coeficient de seguretat, $C_s = 4$, per obtenir el valor de la tensió admissible de l'eix.

$$\text{Eq 25: } \sigma_{\text{adm}} = \frac{\sigma_G}{C_s} = \frac{165000}{4} = 41250 \text{ N/mm}^2$$

La tensió admissible del material a fatiga és molt més elevada que $\sigma_{eq\max} = 27,56 \text{ N/mm}^2$, per aquest motiu es segur que no es trencarà.

1.2.3. Coixinets^[25]

Per evitar el fregament entre les superfícies metàl·liques de l'eix i el xassís s'han incorporat quatre coixinets, PAP 3020 P10, els quals han suportar mil hores de treball. Aquestes hores de treball han estat prèviament calculades mitjançant la pressió que suportaran, la velocitat a la que lliscaran i altres factors que influiran en el desgast del coixinets. Aquestes hores son calculades amb la formula següent:

$$Eq\ 26: Lh = \frac{400}{(p \cdot v)^{1.2}} \cdot f_w \cdot f_A \cdot f_p \cdot f_v \cdot f_R \cdot f_\phi$$

La pressió provocada en un coixinet de diàmetre interior 30 mm, una amplada de 20 mm i amb una força de 8829 N és de 14,715 N/mm².

Per altra banda la velocitat de gir segons el fabricant es calcularia amb l'equació 27, considerant que es farà pivotar el pati a una velocitat de 40 rpm, ja que és una velocitat raonablement alta a la que els peus de l'usuari poden fer girar les taules del xassís :

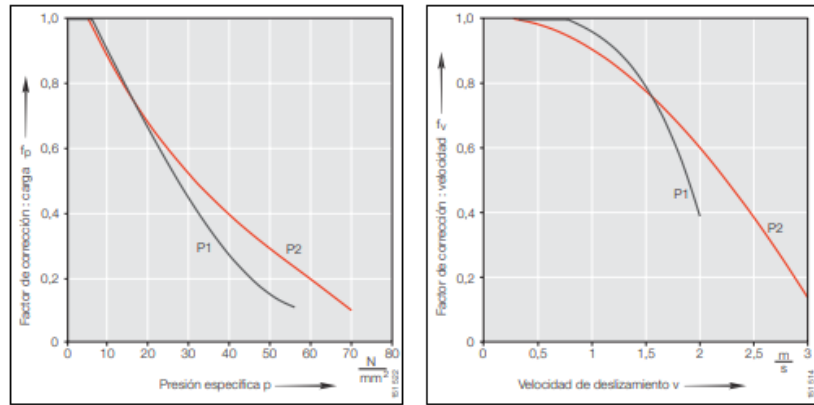
$$Eq\ 27: v = \frac{D_{in} \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot 10^3} = 0,0628\ m/s$$

El factor segons el material de la superfície en els coixinets elegits és de $f_w = 2$ com es pot veure a en la il·lustració 40, degut a que l'eix també està fabricat d'acer inoxidable com s'ha mencionat en l'apartat anterior.

Material de la superficie del eje	f_w
Acero	1
Acero nitrurado	1
Acero inoxidable	2
Acero cromado duro (espesor de capa mínima 0,013 mm)	2
Acero cincado (espesor de capa mínima 0,013 mm)	0,2
Acero fosfatado (espesor de capa mínima 0,013 mm)	0,2
Fundición gris R ₂ 2	1
Aluminio eloxidado	0,4
Aluminio eloxidado duro (Dureza 450 + 50 HV; 0,025 mm de espesor)	2
Aleaciones a base de cobre	0,1 a 0,4
Niquel	0,2

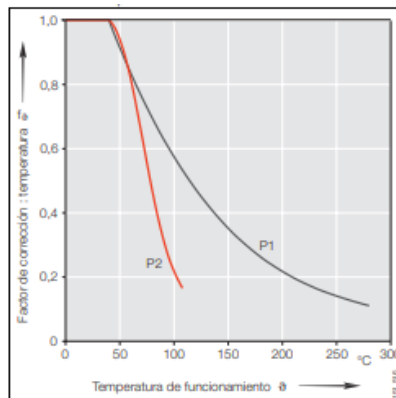
Il·lustració 40: Factor de correcció de material

En la il·lustració 41 es poden observar les gràfiques per obtenir el factor de pressió i de velocitat respectivament, amb una pressió de 10 N/mm^2 el factor de pressió es de 0,9 i amb una velocitat de 0,078 el factor de velocitat és 1.

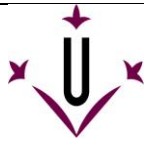


Il·lustració 41: Gràfiques de factor de pressió i factor de velocitat

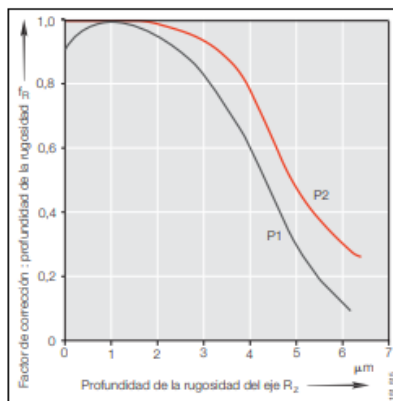
En la il·lustració 42 es poden observar la gràfica per obtenir el factor de temperatura, amb una temperatura ambient de 30°C el factor de temperatura es de 0,9.



Il·lustració 42: Gràfiques de factor de temperatura

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 3 Disseny
	Pàgina: 60 de 119

En el catàleg del coixinet de 30 mm i 34 mm de diàmetre intern i extern respectivament s'obtenen les toleràncies de f7 per l'eix i H7 per el forat. El ajust H7-f7 requereix d'un muntatge a mà, amb lo qual te una rugositat màxima de 0,8 μm . Per lo tant el factor de rugositat extret de la il·lustració 43 és 0,96.



Il·lustració 43: Gràfic de factors de rugositat

El factor de carga f_A serà de 2 degut a que la carrega és giratòria segons indica el fabricant.

Per lo tant un cop obtinguts tots els factors s'aplica l'equació 26 de la duració de vida dels coixinets i dona sobre les 700 hores de treball per lo tant els coixinets és suficientment resistent per a l'ús que se'n farà com a joguet.

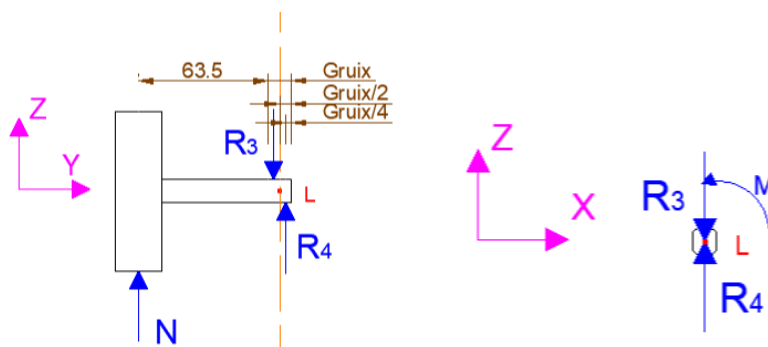
Per bloqueja l'eix axialment, s'han elegit uns anells elàstics que s'utilitzaran de final de carrera per a que l'eix no és mogui. Aquests anells^[26] tindran un diàmetre interior elàstic de 27,9mm amb una amplada de 2, seguint la DIN 471.

1.2.4. Anàlisi de la subjecció del motor amb un eix i de la resistència de les orelles

Per subjectar les rodes al xassís s'han dissenyat dues orelles de 10 mm d'espessor i 31 mm de radi, en el forat s'encaixa l'eix de la roda, on es cargola per fixar-la. Però segons el fabricant d'aquesta roda ha estat dissenyada per suportar el pes sobre dos eixos, per lo qual s'ha de comprovar que és pot muntar sobre un eix, considerant que aquest es d'acer.

1.2.4.1. Anàlisi de la possibilitat de subjectar el motor amb un eix en lloc de amb dos

A continuació es mostren els diagrames de sòlid lliure de la roda i el motor:



Il·lustració 44: Reaccions i forces en el motor en la roda i secció de l'eix amb les reaccions en la part de les orelles

Dels diagrames de sòlid lliures anteriors s'extreuen les equacions següents:

$$\text{Eq 28: } \sum F_z = 0 \rightarrow N - R_3 + R_4 = 0$$

$$\text{Eq 29: } \sum M_L = 0 \rightarrow$$

$$\rightarrow N \cdot \left(63,5 + \frac{10}{2}\right) - (R_3 + R_4) \cdot \frac{10}{2} = 0$$

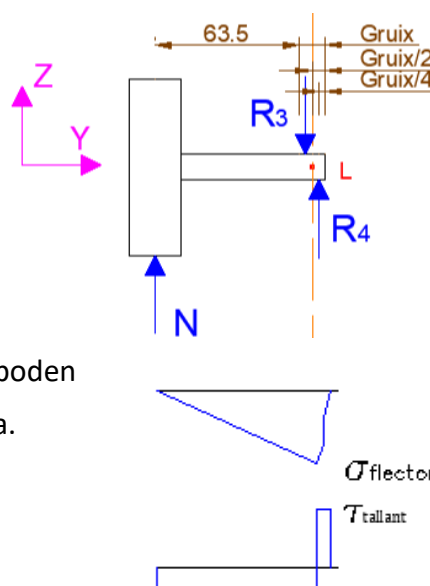
Tenint en compte d'altres apartats que $N = \text{massa total} \cdot \frac{g}{2} = 588,6$, les equacions anteriors es poden resoldre obtenint els valors de les reaccions en la orella.

$$\text{Eq 28: } R_4 = R_3 - 588,6$$


$$\text{Eq 29: } 588,6 \cdot (63,5 + 5) - (R_3 + R_4) \cdot 5 = 0$$

$$R_3 = 4326,21 \text{ N}$$

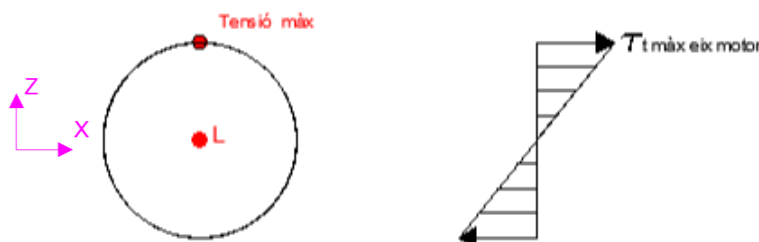
$$R_4 = 3737,61 \text{ N}$$



Il·lustració 45 Diagrama de tensions

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 3 Disseny
	Pàgina: 62 de 119

Amb el valor de les reaccions es calculen els diagrames de tensions, els de moment flector i tallant es mostren en la il·lustració 44 i el del torçor en la il·lustració 45.



Il·lustració 46: Diagrama de tensions provocat pel moment torçor

En els diagrames de la il·lustració 44 és veu clarament que la secció més desfavorable és aquella on s'aplica R_3 , i en el punt més allunyat del centre és on el efecte del moment torçor és màxim del motor de 90 N·m, aquest parell és equivalent a 90000 N·mm i l'eix es considera que té un moment polar d'inèrcia d'un cercle de 13 mm de diàmetre, aquest diàmetre es l'amplada mitja de l'eix que té realment, les mesures del eix es poden consultar en la il·lustració 54.

$$Eq\ 30: J_0 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r_{eix\ motor}^4 = 2803,96\ mm^2.$$

A continuació es calcula la tensió màxima provocada pel torçor en l'eix:

$$Eq\ 31: \tau_{t\ màx} = \frac{M_{torçor} \cdot Radi\ eix\ motor}{J_0} = \frac{90000 \cdot 7}{2803,96} = 224,68\ N/mm^2$$

Aquesta tensió serà variable, ja que amb parell màxim tindrà un valor màxim i sense parell serà nul·la.


Es continua calculant el moment flector màxim i seguidament la tensió màxima a flexió sobre l'eix:

$$Eq\ 32: M_{flector\ màx\ eix\ roda} = N \cdot d_{eix} = 588,6 \cdot \left(63,5 + \frac{10}{2}\right) = 40319,1\ N \cdot mm$$

$$Eq\ 33: \sigma_{flector\ màx} = \frac{M_{flector\ màx\ eix\ roda} \cdot Radi_{eix\ roda}}{I_{z\ eix\ roda}}$$

$$\sigma_{flecto\ màx} = \frac{40319,1 \cdot 5}{3216,9} = 62,67\ N/mm^2$$

A continuació es calcula el tallant en l'eix, la superfície sobre la qual actua és un quadrat de 10x10 mm:

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 3 Disseny
	Pàgina: 63 de 119

$$\text{Eq 34: } \tau_{tallant màx} = \frac{F_{tallant}}{A_{repos eix}} = \frac{3737,61}{10 \cdot 10} = 37,37 \text{ N/mm}^2$$

Aplicant l'equació 35 de Von Misses s'aconsegueix el valor de la tensió equivalent màxima del cicle de carrega:

$$\text{Eq 35: } \theta_{eq màx} = \sqrt{\theta_{flector màx}^2 + \tau_{tallant màx}^2 + \tau_t^2}$$

$$\theta_{eq màx} = \sqrt{62,67^2 + 37,7^2 + 224,68^2} = 236,28 \text{ N/mm}^2$$

Aplicant l'equació 36 de Von Misses s'aconsegueix el valor de la tensió equivalent mínima del cicle de carrega:

$$\text{Eq 36: } \theta_{eq mín} = \sqrt{\theta_m^2 + \tau_{tallant màx}^2}$$

$$\theta_{eq mín} = \sqrt{62,67^2 + 37,7^2} = 73,13 \text{ N/mm}^2$$

Comparant el valor de la tensió equivalent màxima amb la resistència a tracció de l'acer de 700 N/mm^2 es pot afirmar que la roda subjectada per un eix aguantarà els esforços.

Però s'ha de tenir en compte que l'eix també estarà sotmès a fatiga, per lo tant s'ha de comprovar que aguanta aquets esforços mitjançant l'equació 22:

On la σ_w és el límit a fatiga del material, la σ_G la tensió límit en la secció transversal de l'eix. Seguidament es procedeix a trobar el altres factors de l'equació:

Degut a que és un eix llis el coeficient d'entalladura és $\beta_{kb} = 1$.

El coeficient d'influència b_o s'extreu de la gràfica de la il·lustració 39 on coincideix amb la resistència a tracció dels acers σ_B . La resistència a tracció es de 650 N/mm^2 , sobre la corba de la superfície exterior de forja o laminació dona un valor $b_o = 0,55$.


El grau de repòs es calcula de la amb l'equació 23.

On σ_m és la tensió mitja del cicle de carrega que es calcula amb l'equació 24:

$$\sigma_m = 0,5 \cdot (236,28 + 73,13) = 154,7 \text{ N/mm}^2$$

On σ_0 és la tensió superior del cicle de carrega que es calcula:

$$\sigma_0 = \sigma_{màx} = 236,28 \text{ N/mm}^2$$

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 3 Disseny
	Pàgina: 64 de 119

$$R_g = \frac{154,7}{236,28} = 0,654$$

Aquests factors s'han de substituir en l'equació 22 per obtenir el valor de la tensió límit de la secció de l'eix.

$$\sigma_G = \frac{300 \cdot 0,55}{1 \cdot (1 - 0,654)} = 476,88 \text{ N/mm}^2$$

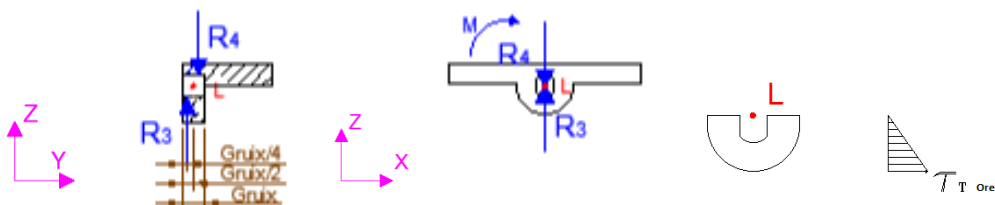
Aquest valor de σ_G s'ha de dividir per un coeficient de seguretat, $C_s = 1,5$, obté el valor de la tensió admissible de l'eix a fatiga com marca l'equació 25.

$$\sigma_{\text{adm eix motor}} = \frac{476,88}{1,5} = 317,91 \text{ N/mm}^2$$

Comparant aquest valor amb la tensió equivalent màxima en l'eix del motor, $\sigma_{eq \text{ màx}} = 236,28 \text{ N/mm}^2$, és comprova que no es trencarà a causa de la fatiga.

1.2.4.2. Anàlisi de la comprovació de la resistència de les orelles

A continuació és mostra el diagrama de sòlid lliure de una de les orelles dels xassís, on apareixen les reaccions que haurà de suportar, la secció més desfavorable es la horitzontal que passa pel punt L. Tenint en compte que el cargol fixa l'eix a l'orella.



Il·lustració 47: Diagrama sòlid lliure de les orelles amb les forces que aquestes han de suportar i diagrama de moment torçor

S'hauran de tenir en compte el tallant, el flector i el torçor a l'hora de calcular la tensió equivalent. Degut a que l'orella sofrirà les tensions que suportà l'eix del motor.

A continuació es calcula la tensió màxima provocada pel torçor en l'eix, tenint en compte que el punt més allunyat és a 31 mm, ja que es el radi exterior de l'orella i que el moment polar d'inèrcia es calcula com si es tractes d'un semicercle massís amb un forat de diàmetre 16, ubicat en el centre del radi ja que es el radi gran de l'eix.

$$\text{Eq 37: } J_0 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot r_{orella}^4 - \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot r_{forat}^4 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 31^4 - \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 8^4 = 72214,7 \text{ mm}^4$$

$$\text{Eq 38: } \tau_{t \text{ màx}} = \frac{M \cdot r_{orella}}{J_0} = \frac{90000 \cdot 31}{72214,7} = 3,86 \text{ N/mm}^2$$


A continuació es calcula el tallant provocat per l'eix sobre el forat de la orella, la superfície sobre la qual actua és un quadrat de 10x10 mm:

$$\text{Eq 39: } \tau_{tallant \text{ màx}} = \frac{R_3}{A_{contacte \text{ forat}}} = \frac{4326,21}{10 \cdot 10} = 43,26 \text{ N/mm}^2$$

Es considerarà la mateixa tensió del flector que en l'eix del motor. Per lo tant la tensió equivalent s'aconsegueix aplicant Von Misses, comparant el valor de la tensió equivalent màxima amb la resistència del alumini de 150 N/mm², utilitzat en la fabricació del xassís i es comprova que les orelles del xassís són suficientment resistents.

$$\text{Eq 40: } \theta_{eq \text{ màx}} = \sqrt{\theta_{flector \text{ màx}}^2 + \tau_{tallant \text{ màx}}^2 + \tau_t^2}$$

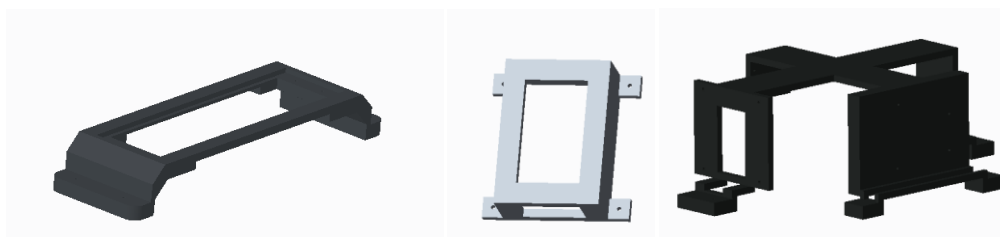
$$\theta_{eq \text{ màx}} = \sqrt{62,67^2 + 43,26^2 + 3,86^2} = 76,248 \text{ N/mm}^2$$

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 3 Disseny
	Pàgina: 66 de 119


1.2.5. Suports i placa auxiliar

Els components electrònics necessiten estar subjectes per evitar desconnexions, curtcircuits o en el cas del giroscopi per mantenir-se sempre paral·lel a la superfície horitzontal del xassís, és per aquest motiu que s'ha dissenyat uns suports per subjectar la placa que incorporarà els interruptors òptic i la IMU.

A més a més, hi han altres components en el patí que fa falta fixar, com la bateria. Aquesta s'ha fixat mitjançant un suport que ha servit per fixar l'Arduino i el ESC. L'ESC en lloc de fixa'l directament amb cargols s'utilitzarà una tapa, que s'unirà al suport mitjançant uns cargols de mètrica 2 i 7.2 mm de tija.



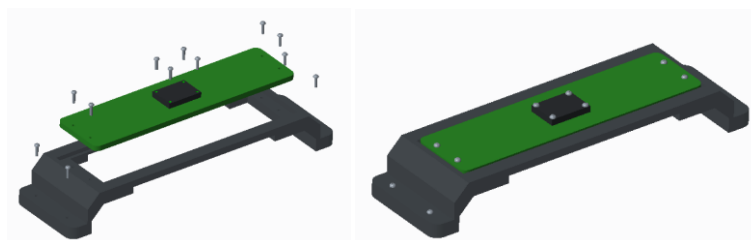
Il·lustració 48: Suport placa sensors, tapa ESC, suport ESC, Arduino i bateria.

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 3 Disseny
	Pàgina: 67 de 119

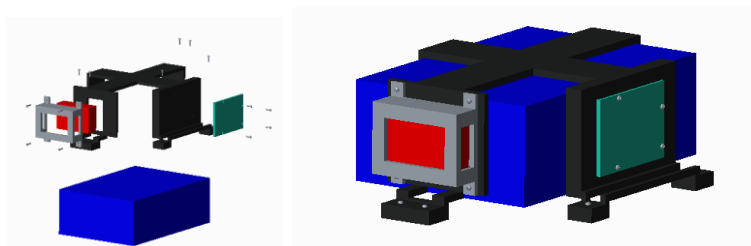
1.2.6. Unions roscales

El motor de cub incorpora un eix que no es mou i sobresurt per fixar-lo al xassís del vehicle utilitzant una femella de mètrica 16, segons els plànols proporcionats pel fabricant. Aquesta unió aguanta fins a 120 kg segons el mateix fabricant.

Per altra banda s'utilitzaran cargols de mètrica 2^[27], amb un pas de rosca de 0,4 mm i 7,2 mm de longitud per subjectar els diferents suports dels diversos components i els diversos sensors electrònics als suports. En la il·lustració 49 i 50 es pot observar com queden els components units als suports.




Il·lustració 49: Conjunt estructura, sensor giroscopi i foto interruptors units



Il·lustració 50: Conjunt estructura, Arduino, ESC i bateria units

En canvi els cargols encarregats d'unir el xassís i la carcassa de plàstics seran de mètrica 2, amb un pas de rosca de 0,4 mm i una longitud de 9,2 mm per poder roscar a una profunditat adient. Aquets mateixos cargols s'utilitzen per fixar la barrera del foto interruptor degut a el grossor del xassís la barrera i les fixacions.


 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 4. Annex
	Pàgina: 68 de 119

Capítol 4. Annex

1. Taula d'antecedents

Taula 2: Característiques dels hoverboards en el mercat

Patinet	Marca	Model	Velocitat	Potència	Dimensions	Pes	Carrega	Diametre rod	Bateria	Distància màx	Pendent màx
Segway	Mini segway	Mini segway	18 km/h							30 km	
Segway	Run & Roll	Easy GO	20 km/h	2000w		22,4 kg				45 km	25º
All road	halo rover		20 km/h	800 W		14 kg	20-120 kg			20 km	18-20º
All road	Tomoloo	V2 eagle	15 km /h	700 W		14 kg	20-120 kg	8,5"		15 km	18-20º
All road	EPIK go	premier	20 km/h	800 W		13 kg	20-120 kg			20 km	18º
All road	EPIK go	sport	16 km/h	800 W		14 kg	20-120 kg			16 km	18º
All road	Swag Run	T6	16 km/h	700 W		14 kg	20-120 kg			16 km	
City	Nilox	Doc 6.5	10k km/h	480 W	584x178	10 kg	100 kg	6.5"	4400 mAh	20 km	
City	Nilox	doc 2 6.5	10 km/h	360 W	584x178	11 kg	100 kg	6.5" all road	4300 mAh	12 km	
City	Woxter	X1S	10-12 km/h		poliarbonato	10,2 kg	20-110 kg	6"	4400 mAh	20 km	20º
City	Woxter	X1S Raptor	10 km/h		590x230x210	13 kg	120 kg	6.5" run flat	4400 mAh	20 Km	15º
City	SK8	GO	12 km/h		CE-ROHS	12 kg	100 kg			15 km	
City	Woxter	SG27-045 X2	12 km/h		585x180x180	13 kg	120 kg			20 km	
City	SK8	GO Plus	12 km/h	700 W		12 kg	100 kg	6.5"	4400 mAh	15 km	
City	Sk8	Yeti	12 km/h		CE-ROHS	12 kg	100 kg			15 km	
City	Woxter	XLL city	12 km/h	700 W	690x280x290	14 kg	110 kg		4400 mAh	20 km	
City	Kawasaki	KX-PRO	15 km/h	500 W	584x168x178	10 kg	100 kg	6.5"	4400 mAh	20 km	30º
City	Kawasaki	KX-PRO 8.0	20 km/h	700 W	640x250x250	12,5 kg	120 kg	8"	4400 mAh	20 km	30º
City	Innjoo	scooter H2	10 km/h			10 kg	100 kg		4400 mAh	15 km	25º
City	Woxter	SG27-084 F10	10 km/h	700 W	810x270x270	15 kg	120 kg		4400 mAh	15 km	
City	SK8	Yeti evo	12 km/h		710x320x330	13,8 kg	100 kg	10"		20 km	
City	Kawasaki	KX PRO10	20 km/h	700 W		14 kg	120 kg			20 km	30º
City	Kawasaki	KX-CROSS	15 km/h	400 W		14 kg	120 kg	8.5"		20 km	30º
City	Momo desing	momo-dakar	15 km/h			14 kg	120 kg	8,5"	4400 mAh	20 km	
City	Nilox	Doc Off-road	10 km/h	700 W	730x230x120	12 kg	100 kg	8"	4300 mAh	20 km	
City	Runfi Roll	smart blue	12 km/h			10,3 kg	110 kg			20 km	15º
Requeriments			30 km/h	700 W o més		màx 30 kg	60 - 90 kg	12"		mín 20 km	30º

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 4. Annex
	Pàgina: 69 de 119

2. Resolució dels estudis dinàmics i cinemàtics


En l'apartat 4 es fa un estudi dinàmic i cinemàtic del sistema a controlar, en aquest annex s'inclouen els diferents resultats dels estudis amb les dades corresponents. En els càlculs s'ha considerat una roda de 12 polsades, amb un pes d'uns 10 kg per roda i s'ha tingut en compte un coeficient de fricció estàtic en paviment sec de 0,65.

En el cas en el que el sistema està accelerant, es resol el sistema 1 i 2 d'equacions (sumatori de forces i moments; roda sense lliscar) i 7 incògnites en una matriu d'un Excel. D'aquesta manera un dels Inputs del sistema és el grau d'inclinació de la taula del pati (Θ), modificant aquest es pot controlar l'acceleració i el parell. Mitjançant un Excel apart s'han estudiat per una acceleració de $0,5 \text{ m/s}^2$ els diferents cassos: per diferents pendents del terreny β ($0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$) i per a diferents masses dels conductors (60 kg, 75 kg, 90kg).

Taula 2: Resultats del parell necessari per avançar a una acceleració de $0,5 \text{ m/s}^2$.


Pes (kg)	Inclinació ($^\circ$)	Parell (N.m)	Inclinació taula ($^\circ$)
60	0	8,6	5
75	0	10	5
90	0	12	5
60	10	26,2	19,2
75	10	31	19,2
90	10	37	19,2
60	20	43,15	33,1
75	20	52,48	33,1
90	20	61	33,1
60	30	54,05	43,8
75	30	66	43,8
90	30	78,5	44

En el cas en el que el sistema va a velocitat constant, s'ha calculat a partir del mateix sistema de 7 equacions (sumatori de forces i moments; roda sense lliscar), però ajustant l'Input del grau d'inclinació de la taula del pati (Θ) per a que l'acceleració sigui el més propera a 0 i així saber el parell necessari per avançar a velocitat constant, per als mateixos casos que en el sistema accelerat. En aquest sistema també s'hi ha introduït la força de fricció amb l'aire a 30 km/h, per calcular el parell màxim a velocitat constant.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 4. Annex
	Pàgina: 70 de 119

Taula 3: Resultats del parell necessari per avançar a una velocitat constant.

Pes (kg)	Inclinació (°)	Parell (N.m)	Inclinació taula (°)
60	0	7,57	4,8
75	0	7,98	4
90	0	8,49	3,5
60	10	25,03	18,9
75	10	29,42	18,2
90	10	33,68	17,65
60	20	42,3	33
75	20	51,9	33
90	20	58,24	31,7
60	30	57	46
75	30	70	45,9
90	30	80	45,5

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 4. Annex
	Pàgina: 71 de 119

3. Característiques elèctriques dels components seleccionats

3.1. Característiques elèctriques de la unitat de mesura inercial seleccionada ^[18]

Taules 4: Característiques elèctriques de la unitat de mesura inercial BNO0055

Condicions de funcionament BNO055						
Paràmetres	Símbol	Condicció	Min	Typ	Max	Unit
Start-Up time	T _{SUP}	Des de Off fins al mode de configuració		400		ms
POR time	T _{POR}	Temps Por TPOR des del reinici al mode normal		650		ms
Data Rate 9DOF @10Hz out put Data rate (If internal oscillator is used)	DR _{tol}			±1		%
Condicions de funcionament de l'acceleròmetre						
Paràmetres	Símbol	Condicció	Min	Typ	Max	Unit
Rang d'acceleració	G _{FS2g}	Seleccionable mitjançant la interfície digital en sèrie		±2		g
	G _{FS4g}			±4		g
	G _{FS8g}			±8		g
	G _{FS16g}			±16		g
Senyals Outputs de l'acceleròmetre (Únicament en mode acceleròmetre)						
Paràmetres	Símbol	Condicció	Min	Typ	Max	Unit
Sensibilitat	S	Tots g _{FSXg} Valors T _A =25°C		1		LSB/mg
Tolerància de la sensibilitat	S _{tol}	T _A =25°C, g _{FSXg}		±1	±4	%
Temperatura sensibilitat Drift	TCS	g _{FSXg} Alimentació nominal V _{DD} Temperatura de funcionament		±0,03		%/K
Sensibilitat subministrant Volt. Drift	S _{VDD}	g _{FSXg} , T _A =25°C, V _{DD_min} ≤ V _{DD} ≤ V _{DD_max}		0,065	0,2	%/V
Zero-g Offset (x,y,z)	Off _{xyz}	g _{FSXg} , T _A =25°C, Alimentació nominal V _{DD} , durant tota la vida	- 150	±80	+150	mg
Zero-g Offset Temperature Drift	TCO	g _{FSXg} , Alimentació nominal V _{DD}		±1	+/-3,5	mg/V
Zero-g Offset Supply Volt. Drift	Off _{VDD}	g _{FSXg} , T _A =25°C, V _{DD_min} ≤ V _{DD} ≤ V _{DD_max}		1,5	2,5	mg/V
Ample de banda	Bw _g	2 nd filtre d'ordre, ample de banda programable		8		Hz
	Bw ₁₆			16		Hz
	Bw ₃₁			31		Hz
	Bw ₆₃			63		Hz
	Bw ₁₂₅			125		Hz
	Bw ₂₅₀			250		Hz
	Bw ₅₀₀			500		Hz
	Bw ₁₀₀₀			1000		Hz
No linealitat	NL	La millor recta en línia recta, g _{fs2g}		0,5	2	%FS
Output noise	n _{rms}	g _{fs2g} , T _A =25°C, Alimentació nominal V _{DD} mode normal		150	190	µg/√Hz

Característiques mecàniques de l'acceleròmetre						
Paràmetres	Símbol	Condicció	Min	Typ	Max	Unit
Sensibilitat de l'eix creuat	CAS	Aportació relativa de dos dels tres eixos		1	2	%
Error d'alineació	E _A	Relatiu al esquema de paquets		0,5	2	º


Condicions de funcionament de l'acceleròmetre						
Paràmetres	Símbol	Condicció	Min	Typ	Max	Unit
Rate range	R _{FS125}	Seleccionable mitjançant una interfície digital en sèrie		125		º/s
	R _{FS250}			250		º/s
	R _{FS500}			500		º/s
	R _{FS1000}			1000		º/s
	R _{FS2000}			2000		º/s

Senyal de sortida del Giroscopi (Mode solament de giroscopi)						
Paràmetres	Símbol	Condicció	Min	Typ	Max	Unit
Sensibilitat mitjançant registre Map	S	T _A =25ºC		16,0 900		LSB/º/ s Rad/s
Sensibilitat de tolerància	S _{tol}	T _a =25ºC, R _{FS2000}		±1	±3	%
Canvi de sensibilitat sobre la temperatura	TCS	Alimentació nominal V _{DD} -40ºC ≤ T _A ≤ + 85ºC R _{FS2000}		±0,03	±0,07	%/K
Sensibilitat d'alimentació Volt. Drift	S _{VDD}	T _A =25ºC V _{DD_min} ≤ V _{DD} ≤ V _{DD_max}		<0,4		%/V
No linealitat	NL			±0,05	±0,2	%FS
Zero-rate Offset	Off Ω _x Ω _y i Ω _z	Alimentació nominal V _{DD} T _A =25ºC, slow and fast offset cancellation off	-3	±1	+3	º/s
Zero-Ω Offset Canvi de temperatura	TCO	Alimentació nominal V _{DD} - 40ºC ≤ T _A ≤ + 85ºC R _{FS2000}		±0,015	±0,03	º/s per K
Zero-Ω Offset Alimentació Volt. Drift	Off Ω _{VDD}	T _A =25ºC V _{DD_min} ≤ V _{DD} ≤ V _{DD_max}		0,1		º/s/V
Output Noise	n _{rms}	Rms, BW=47 Hz		0,1	0,3	º/s
Ample de banda BW	f _{.3dB}			523		
				230		
				116		
				64		
				47		
				32		
				23		
				12		

Característiques mecàniques del giroscopi						
Paràmetres	Símbol	Condicció	Min	Typ	Max	Unit
Sensibilitat a l'eix creuat	CAS	Sensibilitat als estímuls en direcció sense sentit		±1	±3	%

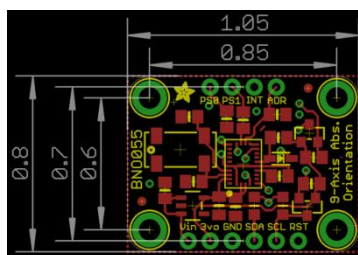
Condicions funcionals del magnetòmetre						
Paràmetres	Símbol	Condicció	Min	Typ	Max	Unit
Magnetic field range	Brg,xy	$T_A=25^{\circ}\text{C}$	±1200	±1300		μT
	Brg,z		±2000	±2500		μT
Magnetometer heading accuracy	As heading	30 μT geometria horitzontal			±2,5	deg

Senyal de sortida del magnetòmetre						
Paràmetres	Símbol	Condicció	Min	Typ	Max	Unit
Resolució	$D_{res,m}$	$T_A=25^{\circ}\text{C}$		0,3		μT
Gain error	$G_{err,m}$	After API compensation $T_A=25^{\circ}\text{C}$ Valor nominal d'alimentació V_{DD}		±5	±8	%
Sensibilitat a la temperatura Drift	TCSm	After API compensation - 40 °C ≤ T_A ≤ +85°C Alimentació nominal V_{DD}		±0,01	±0,03	%/K
Zero-B offset	OFFm	$T_A=25^{\circ}\text{C}$		±40		μT
Zero-B offset	OFFm,cal	Després de la calibració en el mode fusió - 40 °C ≤ T_A ≤ +85°C		±2		μT
Zero-B offset Temperature Drift	TCOm	- 40 °C ≤ T_A ≤ +85°C		±0,23	±0,37	μT/K
Full-scale Nonlinearity	NLm,FS	Millor en línia recta			1	%FS
Output Noise	$n_{rms,lp,m,xy}$	Low power preset X, y-axis, $T_A=25^{\circ}\text{C}$ Nominal V_{DD} Supplies		1		μT
	$n_{rms,lp,m,xy}$	Low power preset z-axis, $T_A=25^{\circ}\text{C}$ Nominal V_{DD} Supplies		1,4		μT
	$n_{rms,lp,m,xy}$	Regular preset , $T_A=25^{\circ}\text{C}$ Nominal V_{DD} Supplies		0,6		μT
	$n_{rms,lp,m,xy}$	Enhanced regular preset $T_A=25^{\circ}\text{C}$ Nominal V_{DD} Supplies		0,5		μT
	$n_{rms,lp,m,xy}$	High accuracy preset $T_A=25^{\circ}\text{C}$ Nominal V_{DD} Supplies		0,3		μT
Powe Supply Rejection rate	PSRR _m	$T_A=25^{\circ}\text{C}$ Nominal V_{DD} Supplies		±0,5		μT/V

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 4. Annex
	Pàgina: 74 de 119

Valors màxims absoluts						
Paràmetres	Símbol	Condicció	Min	Typ	Max	Unit
Voltatge at suppl Pin	V_{DD} Pin		-0,3		4,2	V
Voltatge at any Logic Pin	V_{DDIO} Pin		-0,3		3,6	V
Passive storage Temp. Range	$V_{non-supply}$ Pin		-0,3		$V_{DDIO} + 0,3$	V
Mechanical shock	Trps	$\leq 65\%$ rel. H	-50		+150	°C
	MechSho $ck_{200\mu s}$	Dutation $\leq 200 \mu s$			1000 0	g
	MechSho ck_{1ms}	Dutation $\leq 1 ms$			2000	g
	MechSho $ck_{freefall}$	Free fall on to hard surfaces			1,8	m
ESD	ESD_{HBM}	HBM, at any Pin			2	KV
	ESD_{CDM}	CDM			400	V
	ESD_{MM}	MM			200	V

A continuació s'adjunten les dimensions del BNO055^[28] en la il·lustració 51 :



Il·lustració 51: Dimensions del BNO0055

3.2. Característiques elèctriques del sensor foto interruptor [29]

A continuació s'adjunten valors màxims de funcionament i característiques elèctriques dels sensor interruptor que utilitza el FC-03.

Taula 5: Absolute maximun rating ($T_a=25^{\circ}\text{C}$)

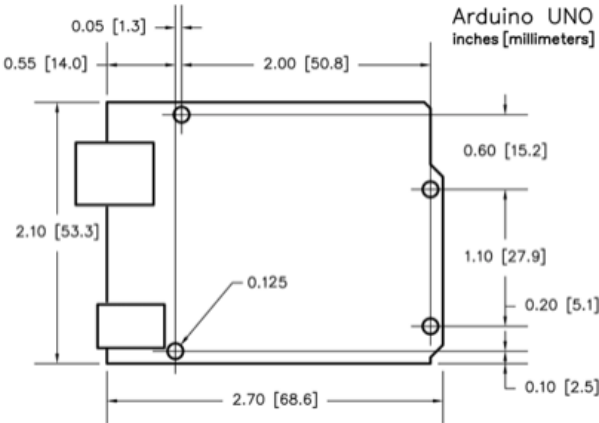
Parameter		Symbol	Ratings	Unit
Input	Power Dissipation at (or below) 25°C Free Air Temperature	P_d	75	mW
	Reverse Voltage	V_R	5	V
	Forward Current	I_F	50	mA
	Peak Forward Current (*1) Pulse width $\leq 100\mu\text{s}$, Duty cycle = 1%	I_{FP}	1	A
Output	Collector Power Dissipation	P_C	75	mW
	Collector Current	I_C	20	mA
	Collector-Emitter Voltage	$B V_{CEO}$	30	V
	Emitter-Collector Voltage	$B V_{ECO}$	5	V
Operating Temperature		T_{opr}	-25~+85	°C
Storage Temperature		T_{stg}	-40~+85	°C
Lead Soldering Temperature (*2) (1/16 inch form body for 5 seconds)		T_{sol}	260	°C

Taula 6: Electro-Optical Characteristics ($T_A=25^{\circ}\text{C}$)

Parameter		Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Conditions
Input	Forward Voltage	V_{F1}	---	1.2	1.5	V	$I_F = 20\text{mA}$ dd
		V_{F2}	---	1.4	1.85		$I_F=100\text{mA}$, $t_p=100\mu\text{s}$, $t_p/T=0,01$
		V_{F3}	---	2.6	4.0		$I_F=1\text{A}$, $t_p=100\mu\text{s}$, $t_p/T=0,01$
	Reverse Current	I_R	---	---	10	μA	$V_R = 5\text{V}$
	Peak Wavelength		---	940	---	nm	$I_F = 20\text{mA}$
	View Angle	201/2	---	60	---	Deg	$I_F = 20\text{mA}$
Output	Dark Current	I_{CEO}	---	---	100	nA	$V_{CE} = 20\text{V}$, $E_e = 0\text{mW/cm}^2$
	C-E Saturation Voltage	$V_{CE}(\text{sat})$	---	---	0.4	V	$V_{CE} = 5\text{V}$ $I_F = 20\text{mA}$
Transfer Characteristics	Collect Current	$I_C(\text{ON})$	0.5	---	10	mA	$V_{CE}=5\text{V}$ $I_C=1\text{mA}$ $R_L=1\text{k}\Omega$
	Rise time	t_r	---	15	---	μsec	
	Fall time	t_f	---	15	---	μsec	

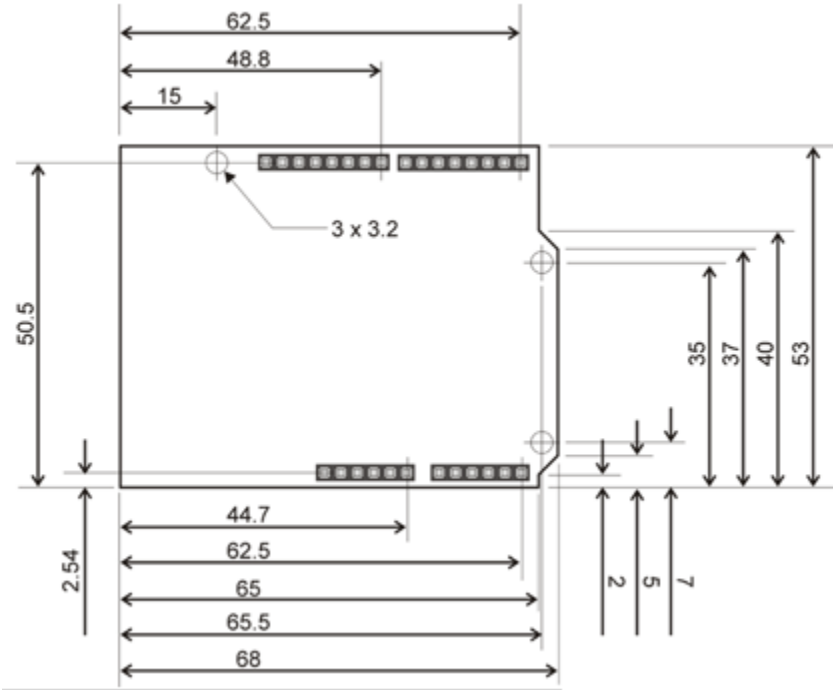
3.3. Dimensions de l'Arduino uno ^[30]

En la següent il·lustració hi han les distàncies dels diferents forats per fixar el microprocessador.



Il·lustració 52: Ubicació dels forats del Arduino

En aquesta imatge estan representades les dimensions de l'Arduino.

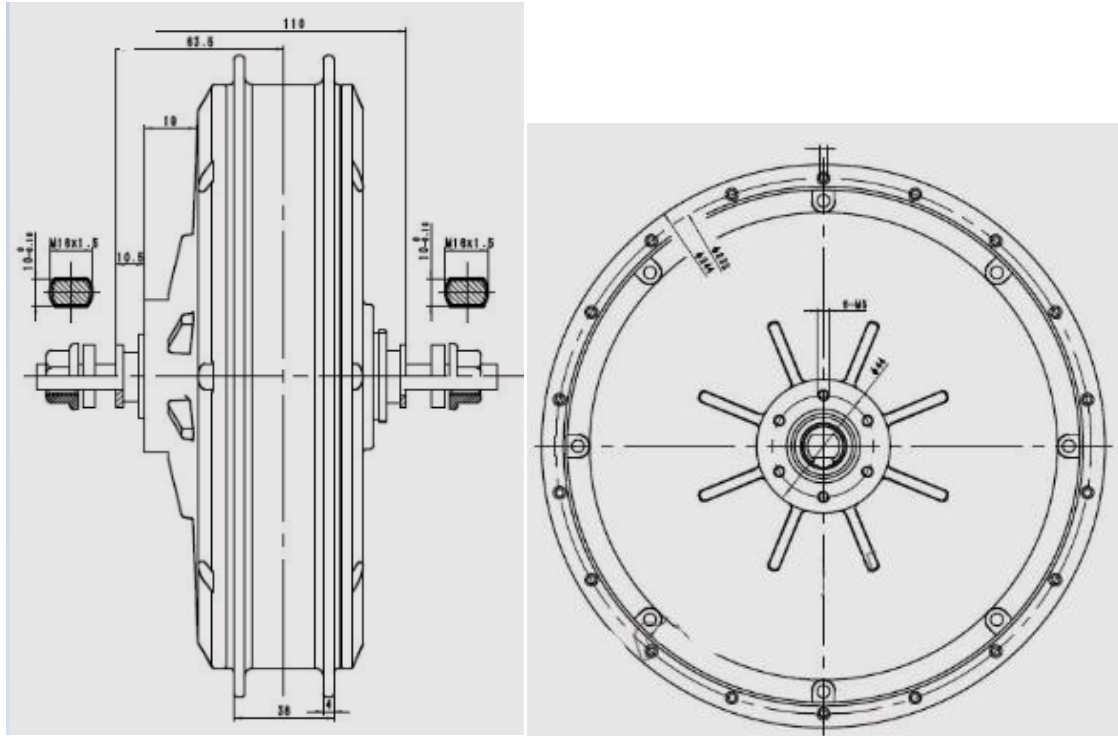


Il·lustració 53: Dimensions Arduino




3.4. Dades del motor Brushless de cub ^[21]

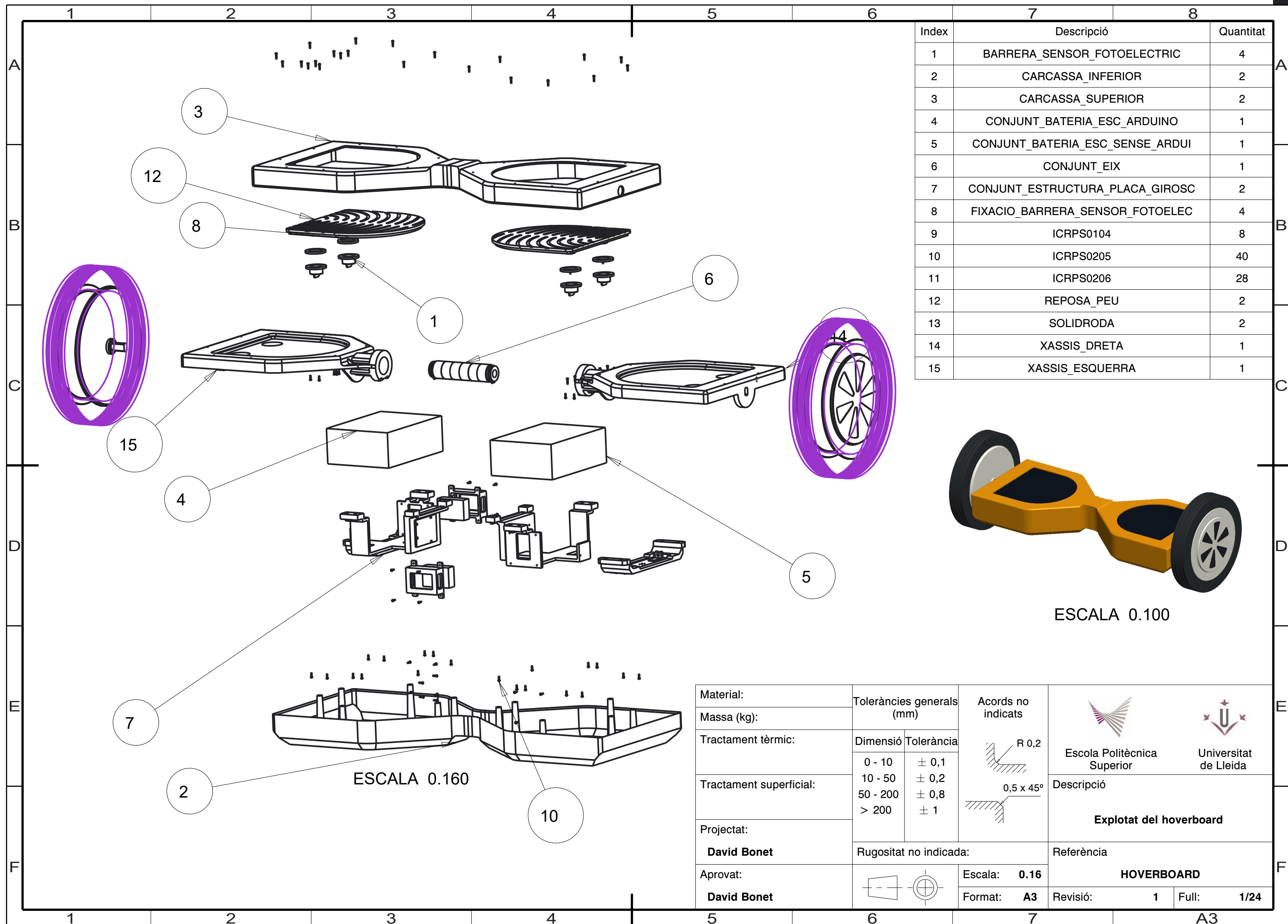
A continuació s'adjunten les mesures proporcionades pel fabricant:

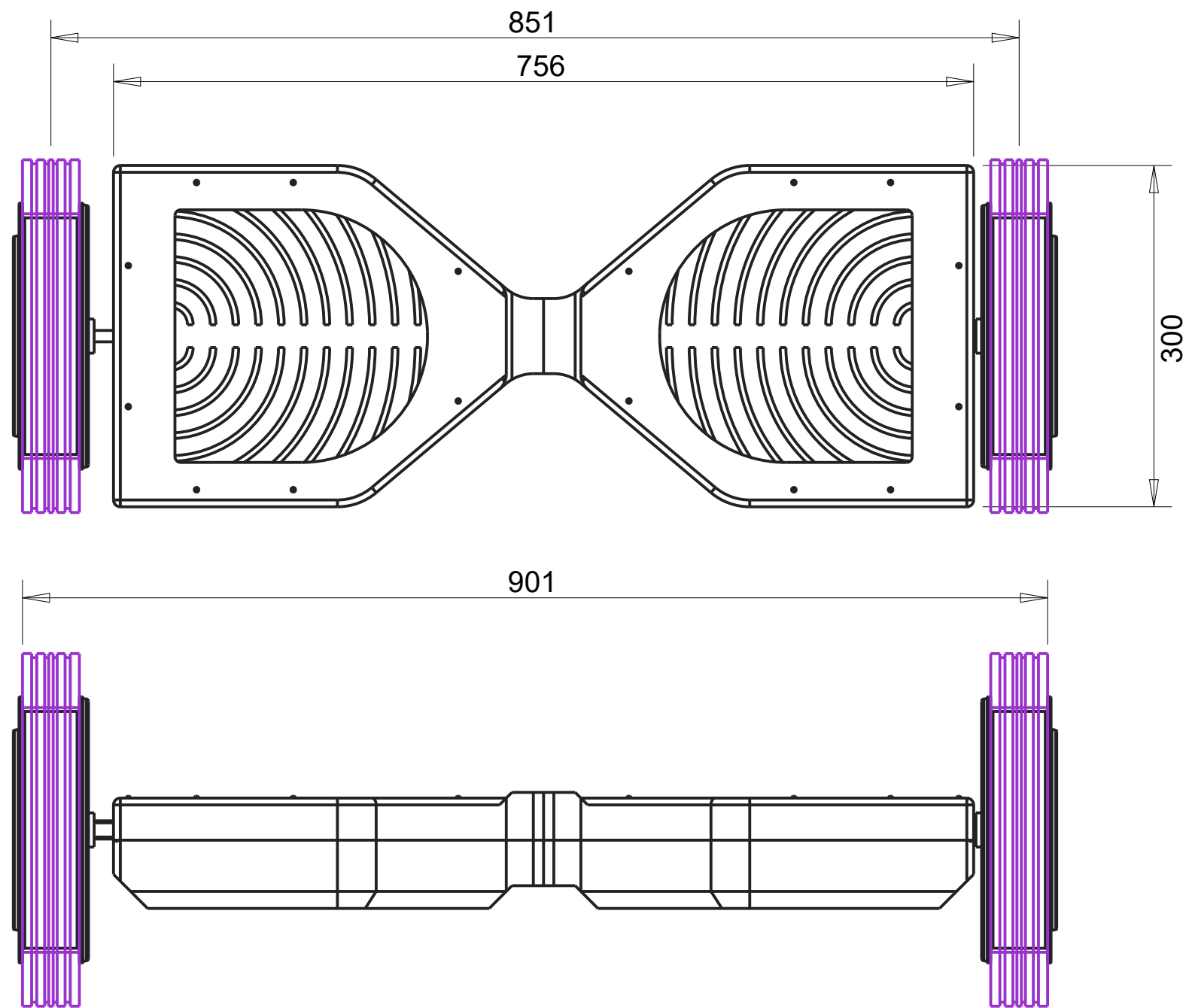


Il·lustració 54: Dimensions del motor a la roda proporcionades pel fabricant

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 5. Plànols
	Pàgina: 78 de 119

Capítol 5. Plànols



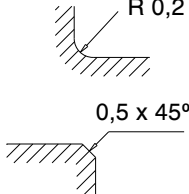
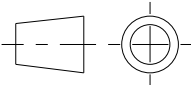


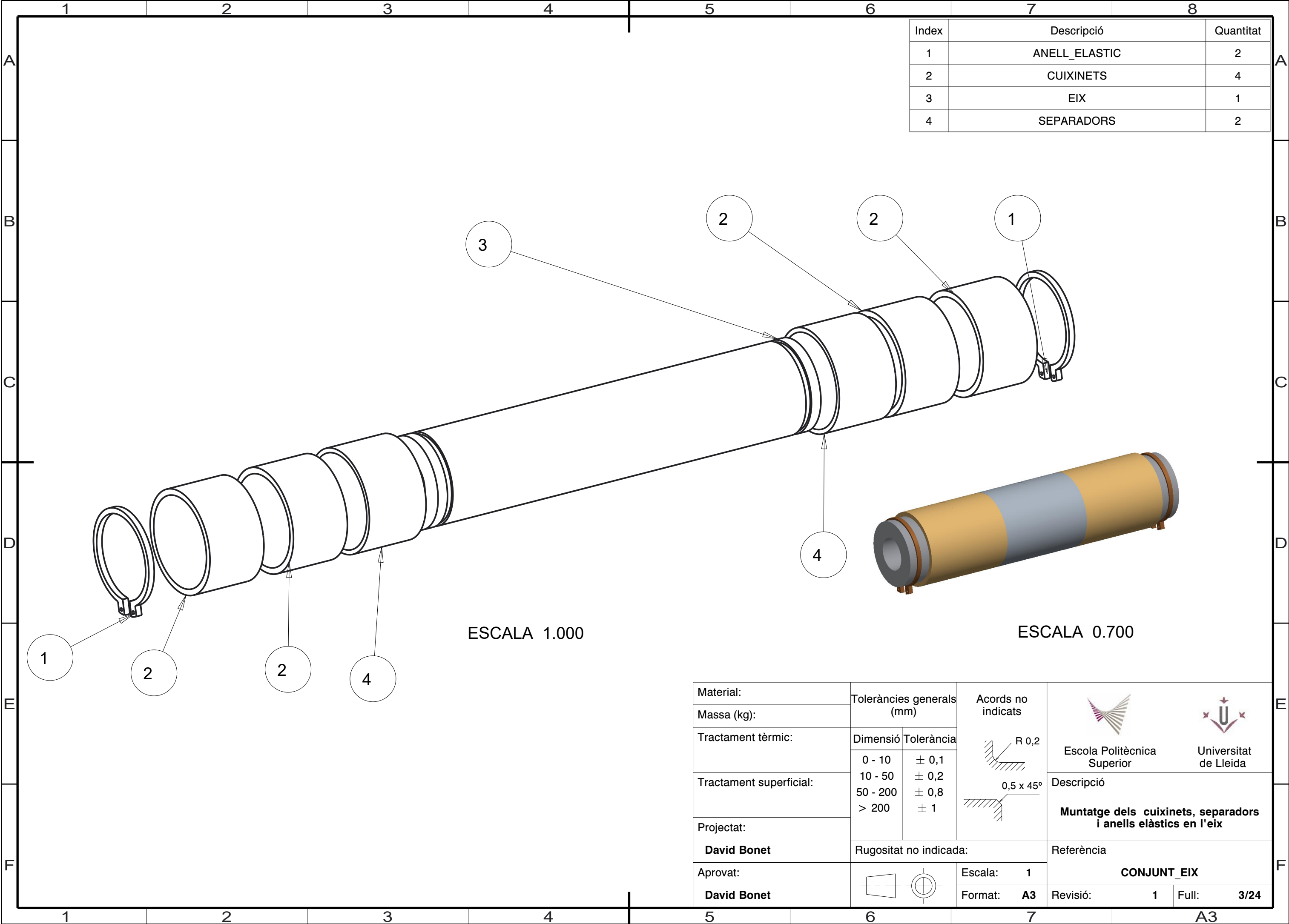


ESCALA 0.200

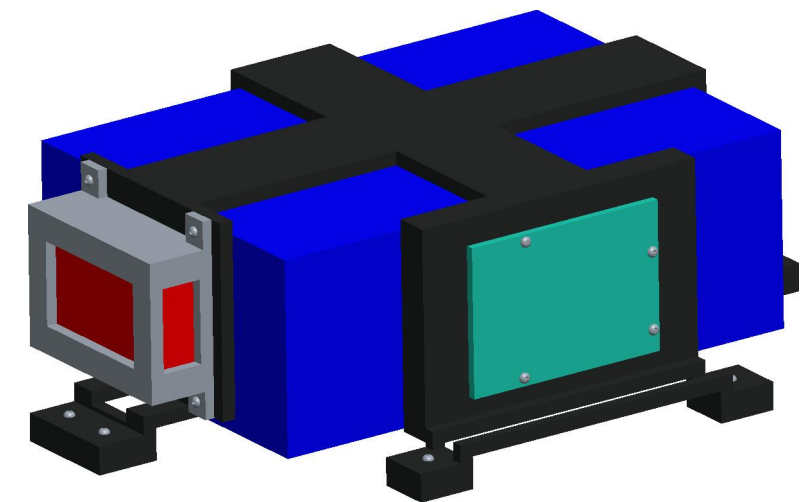
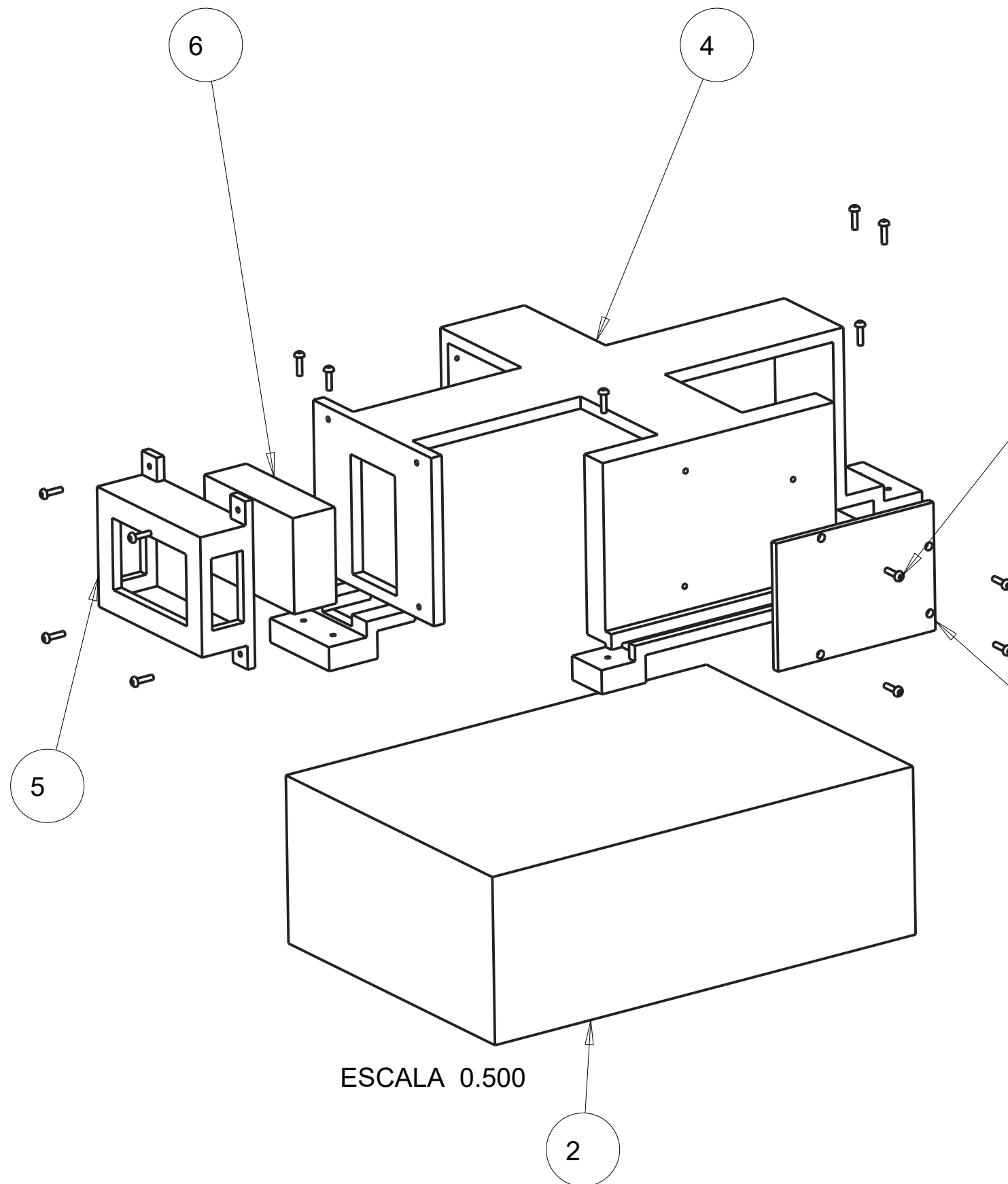


ESCALA 0.080



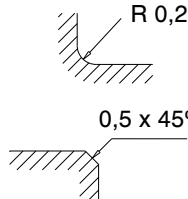
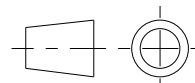
Material:	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats			
Massa (kg):						
Tractament tèrmic:	Dimensió	Tolerància		Descripció		
Tractament superficial:	0 - 10 10 - 50 50 - 200 > 200	± 0,1 ± 0,2 ± 0,8 ± 1		Mesures genèriques del hoverboard		
Projectat:	Rugositat no indicada:			Referència		
David Bonet				HOVERBOARD		
Aprovat:			Escala: 0.2	Revisió: 1		
David Bonet			Format: A3	Full: 2/24		

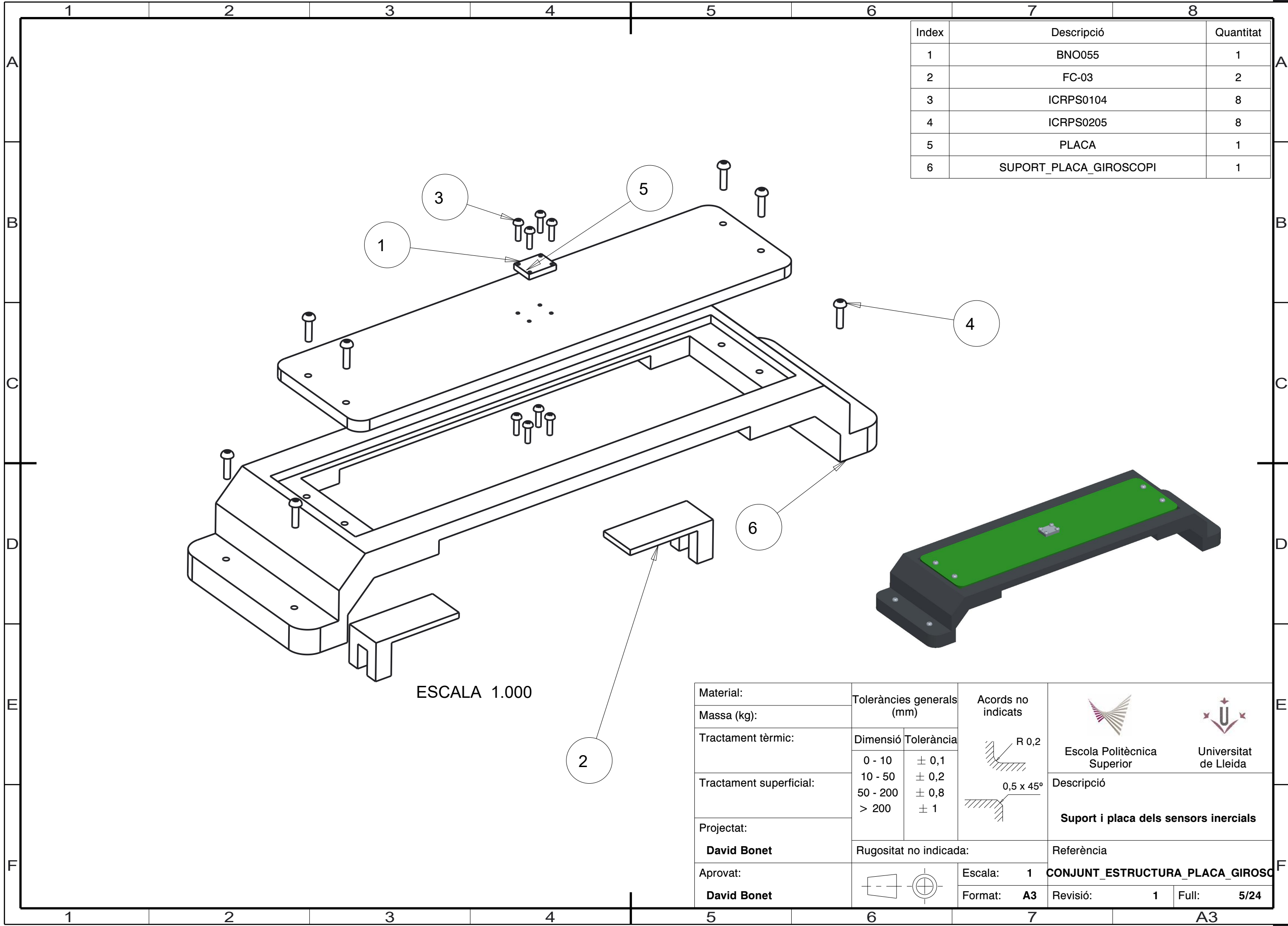


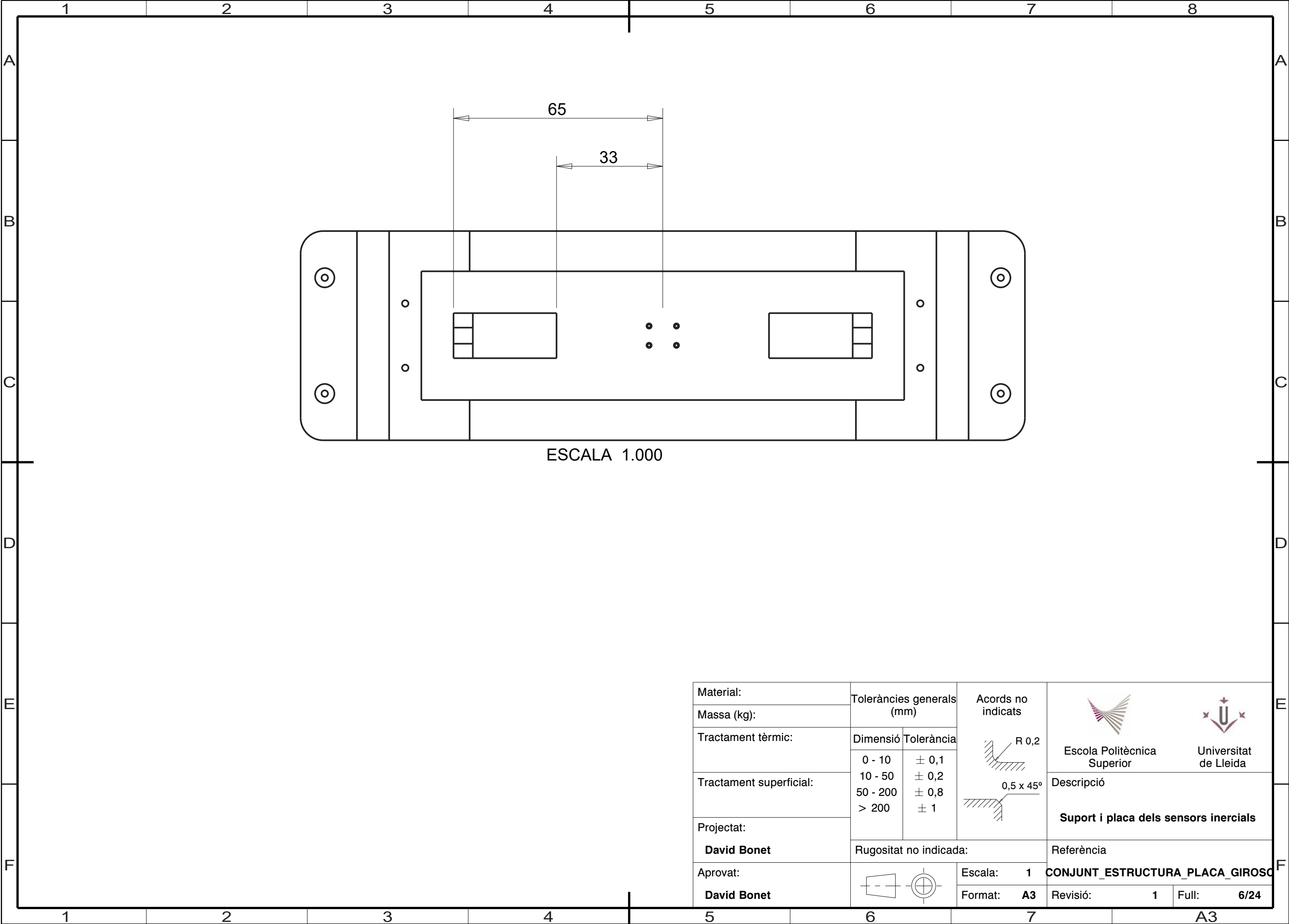
Index	Descripció	Quantitat
1	ARDUINO	1
2	BATERIA	1
3	ICRPS0205	14
4	SUPORT_BATERIA_ARDUINO_ESC	1
5	TAPA_VESC	1
6	VESC	1

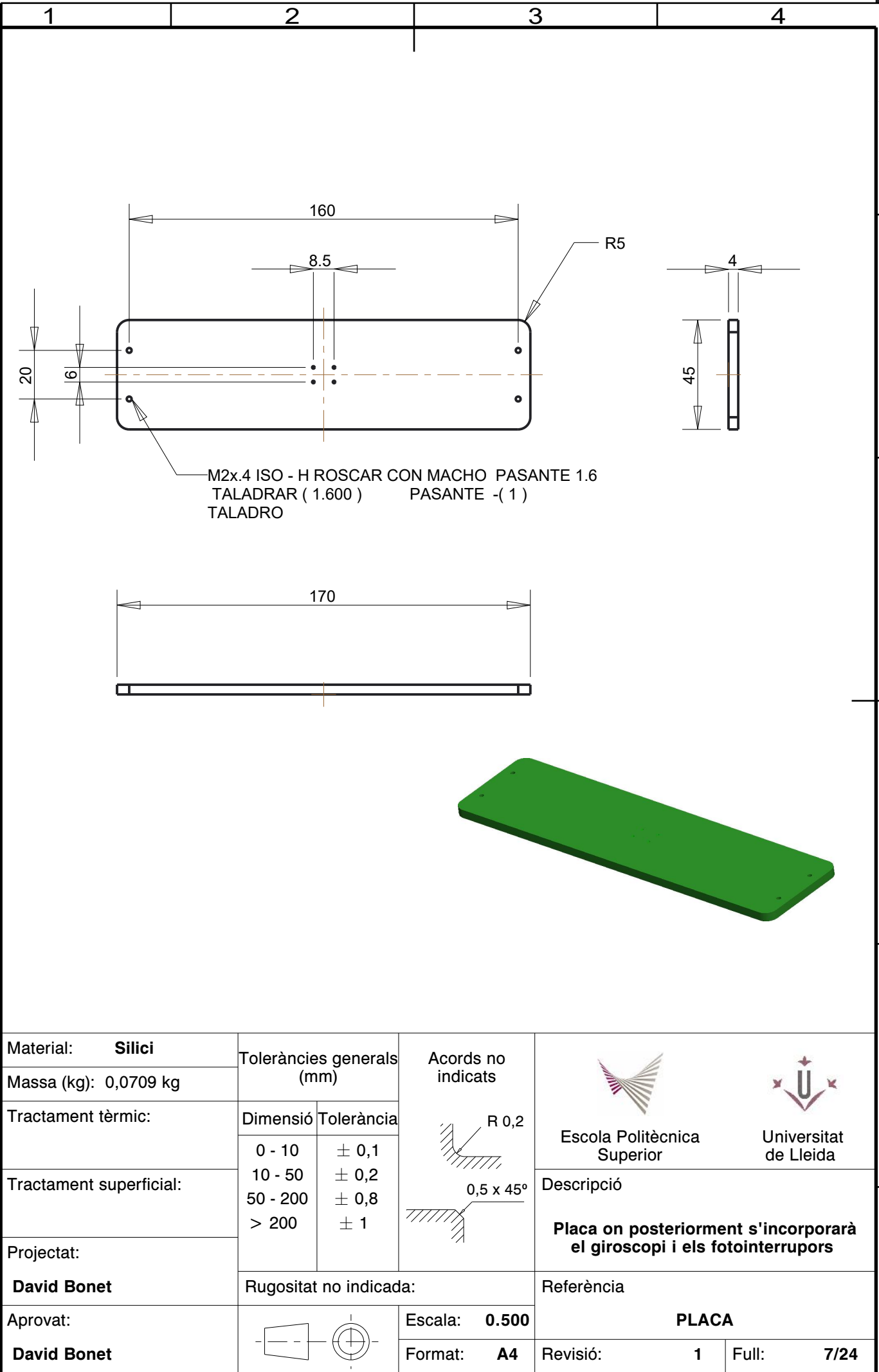


ESCALA 0.400

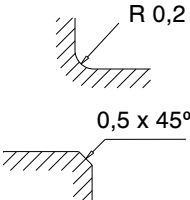


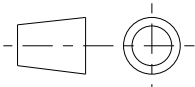
Material:	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats				
Massa (kg):							
Tractament tèrmic:	Dimensió	Tolerància		Escola Politècnica Superior		Universitat de Lleida	
Tractament superficial:	0 - 10	± 0,1		Descripció			
	10 - 50	± 0,2					
	50 - 200	± 0,8					
	> 200	± 1	Estructura que subjecta la bateria, el ESC i l'Arduino				
Projectat:	Rugositat no indicada:			Referència			
David Bonet				CONJUNT_BATERIA_ESC_ARDUINO			
Aprovat:			Escala: 0.500	CONJUNT_BATERIA_ESC_ARDUINO			
David Bonet			Format: A3				

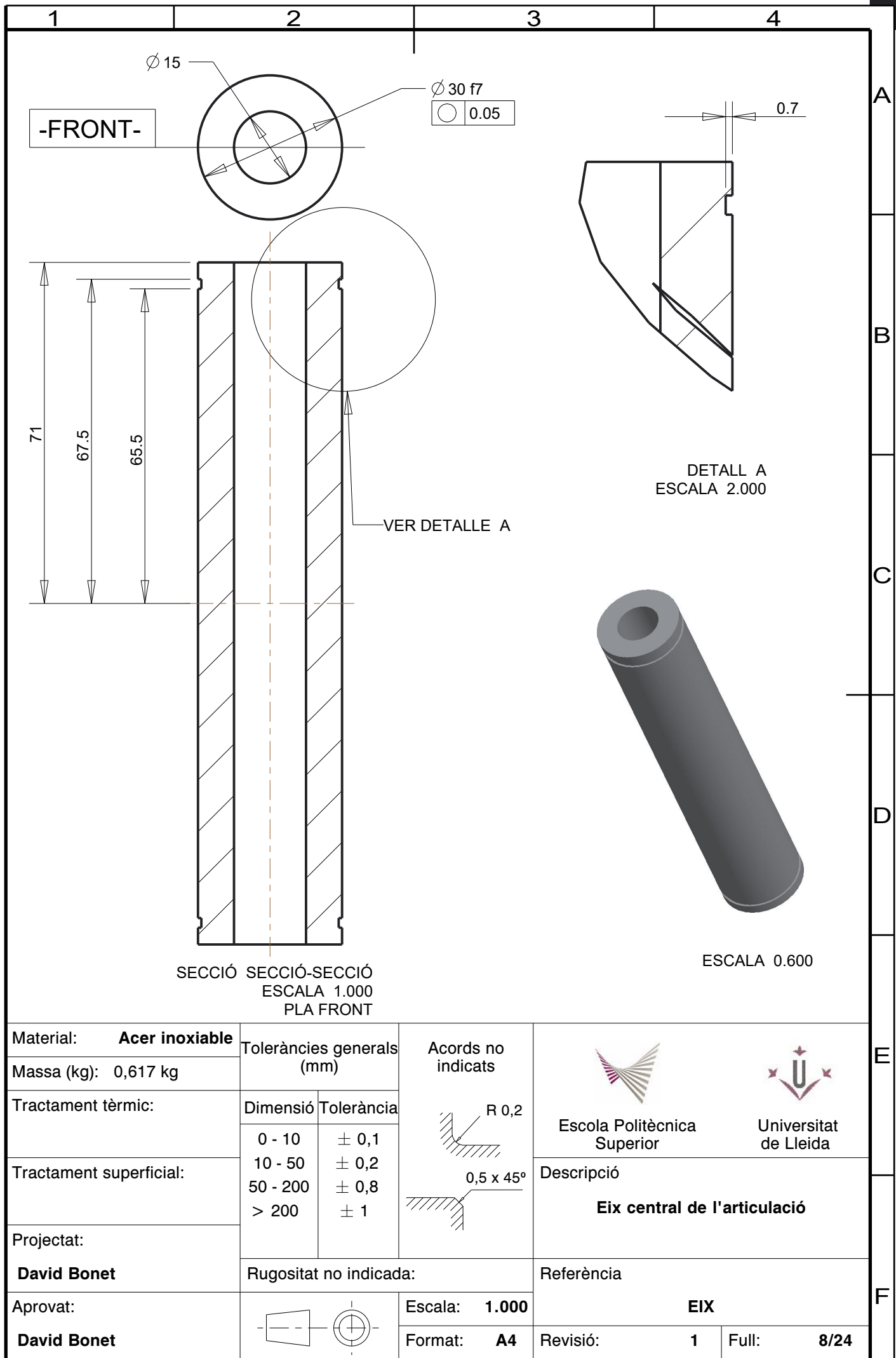




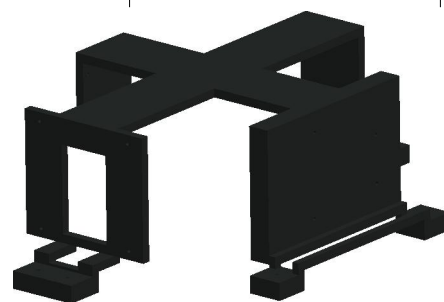
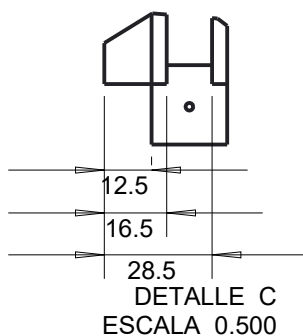
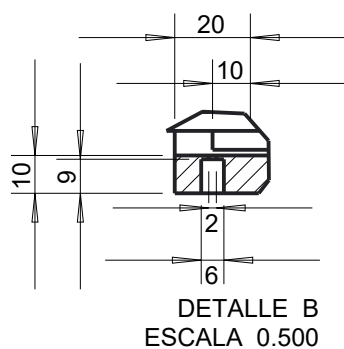
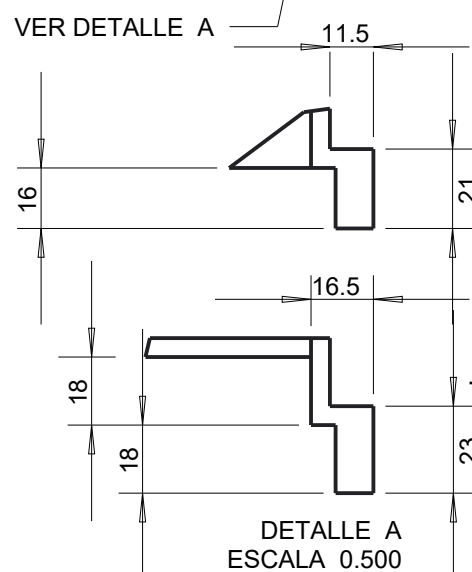
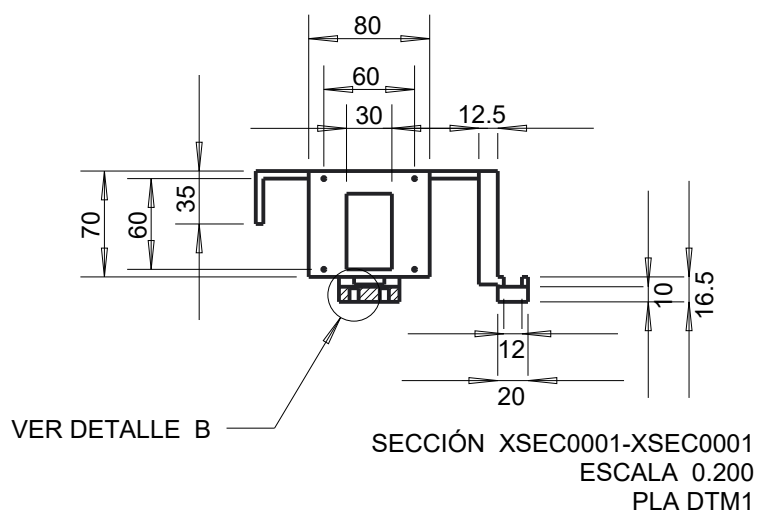
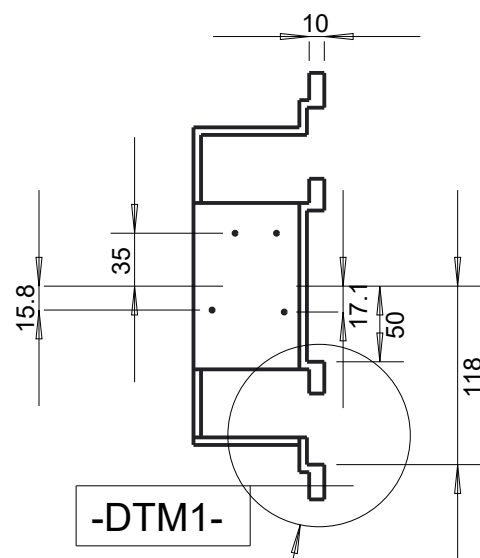
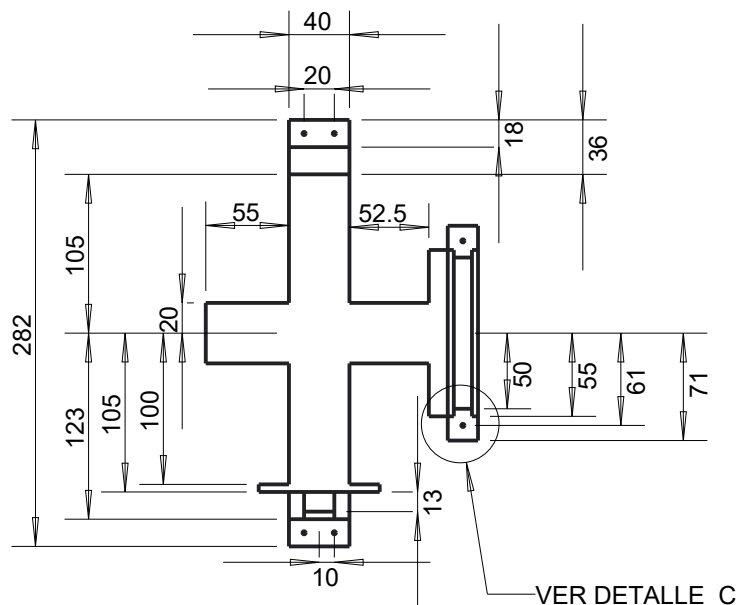




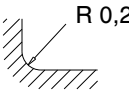
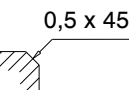
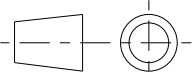
A
B
C
D
E
F

Material: Silici	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats 					
Massa (kg): 0,0709 kg				Escola Politècnica Superior		Universitat de Lleida		
Tractament tèrmic:	Dimensió	Tolerància		Descripció Placa on posteriorment s'incorporarà el giroscopi i els fotointerruptors				
Tractament superficial:	0 - 10	± 0,1						
	10 - 50	± 0,2						
	50 - 200	± 0,8						
	> 200	± 1						
Projectat:					Referència			
David Bonet	Rugositat no indicada:							
Aprovat:			Escala: 0.500	PLACA				
David Bonet			Format: A4					Revisió: 1



1	2	3	4
<div><div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div>21</div></div><div><div><div></div><div></div></div></div></div> <div><div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><</div></div></div>			



Material: Plàstic imp. 3D	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats	 	
Massa (kg): 0,3 kg				Descripció	
Tractament tèrmic:	Dimensió	Tolerància	 	Peça estructural del interior del hoverboard	
Tractament superficial:	0 - 10	± 0,1			
	10 - 50	± 0,2		Referència	
	50 - 200	± 0,8			
Projectat:	> 200	± 1		SUPORT_BATERIA_ARDUINO_ESC	
David Bonet	Rugositat no indicada:		Escala: 0.2	Revisió: 1	Full: 10/24
Aprovat:			Format: A4		
David Bonet					

1

2

3

4

A

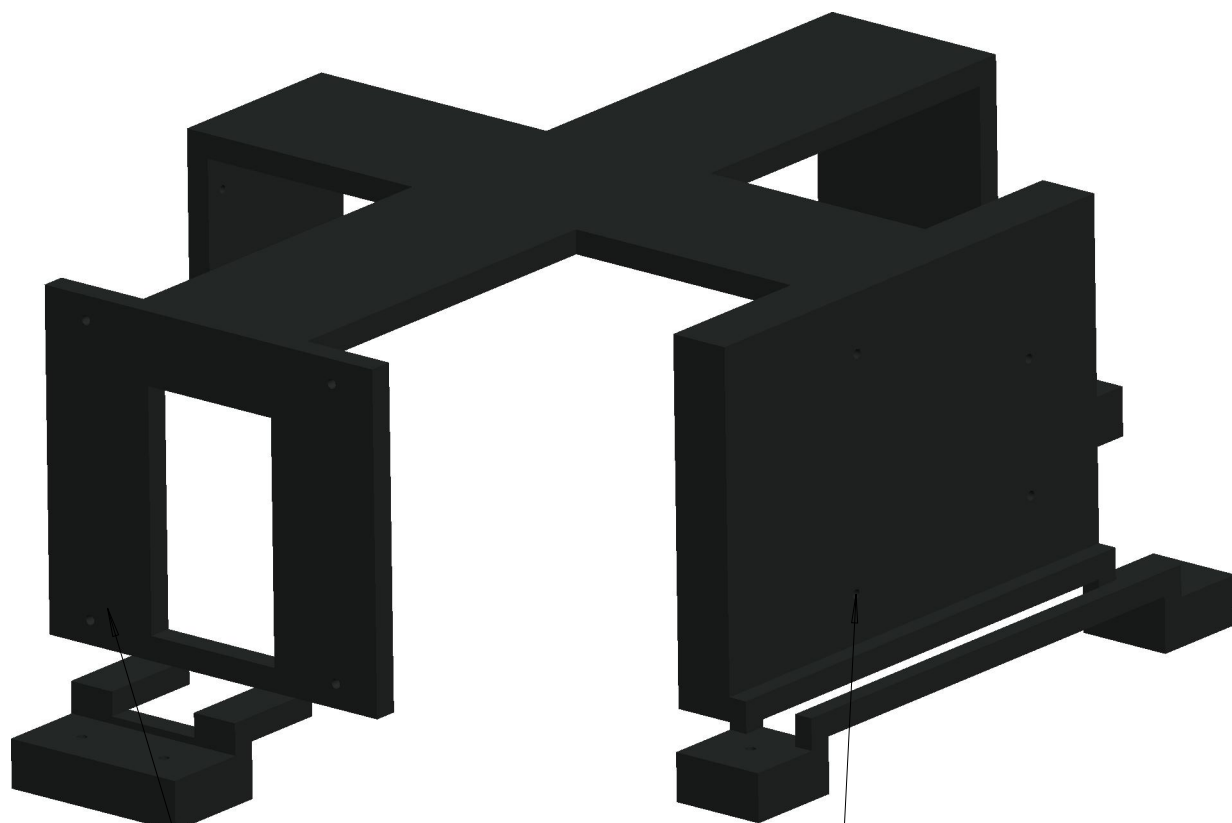
B

C

D

E


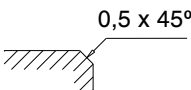


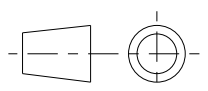
F

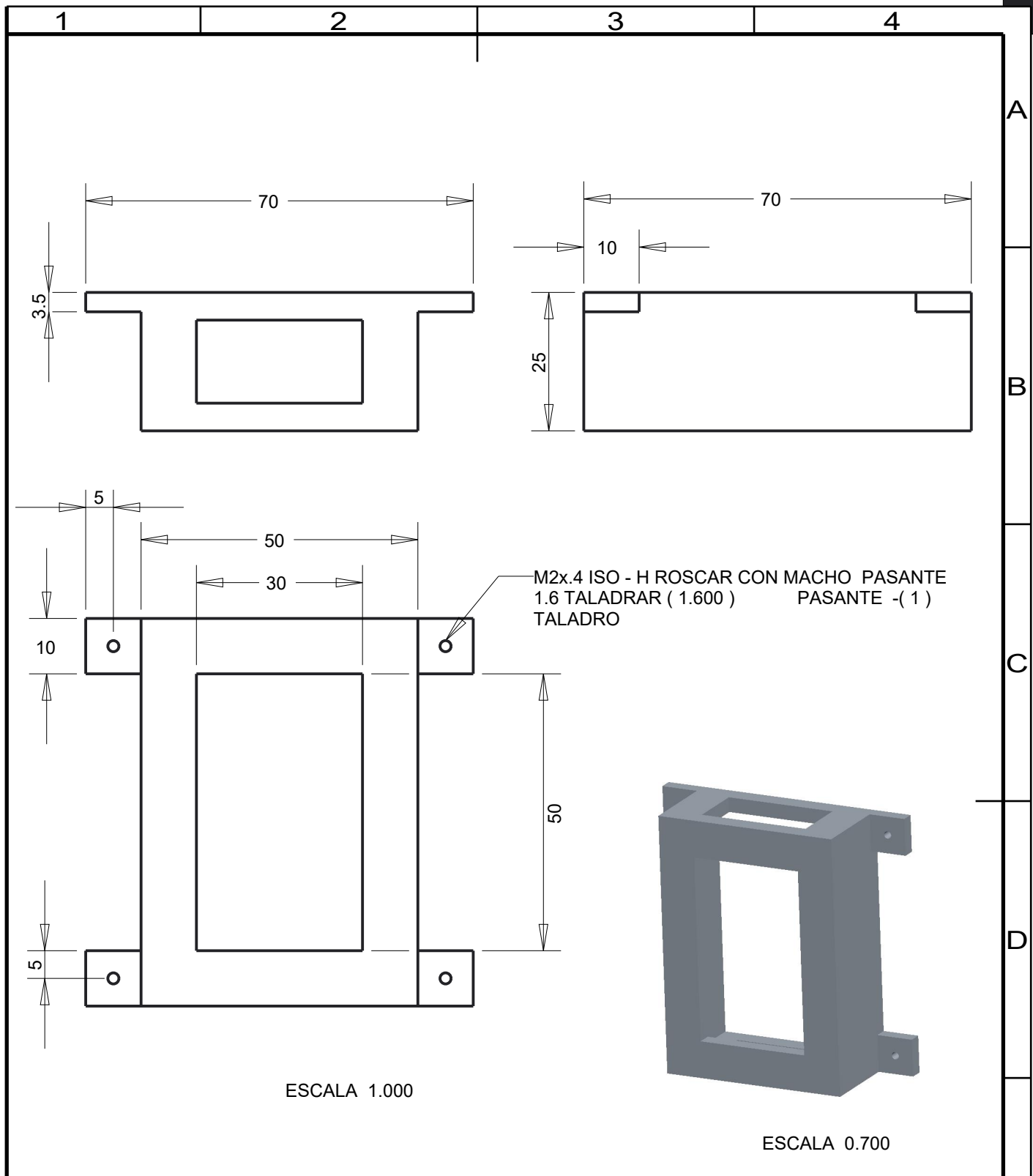


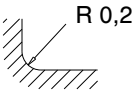
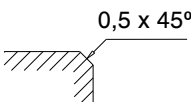


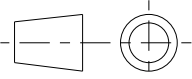
ESCALA 0.700

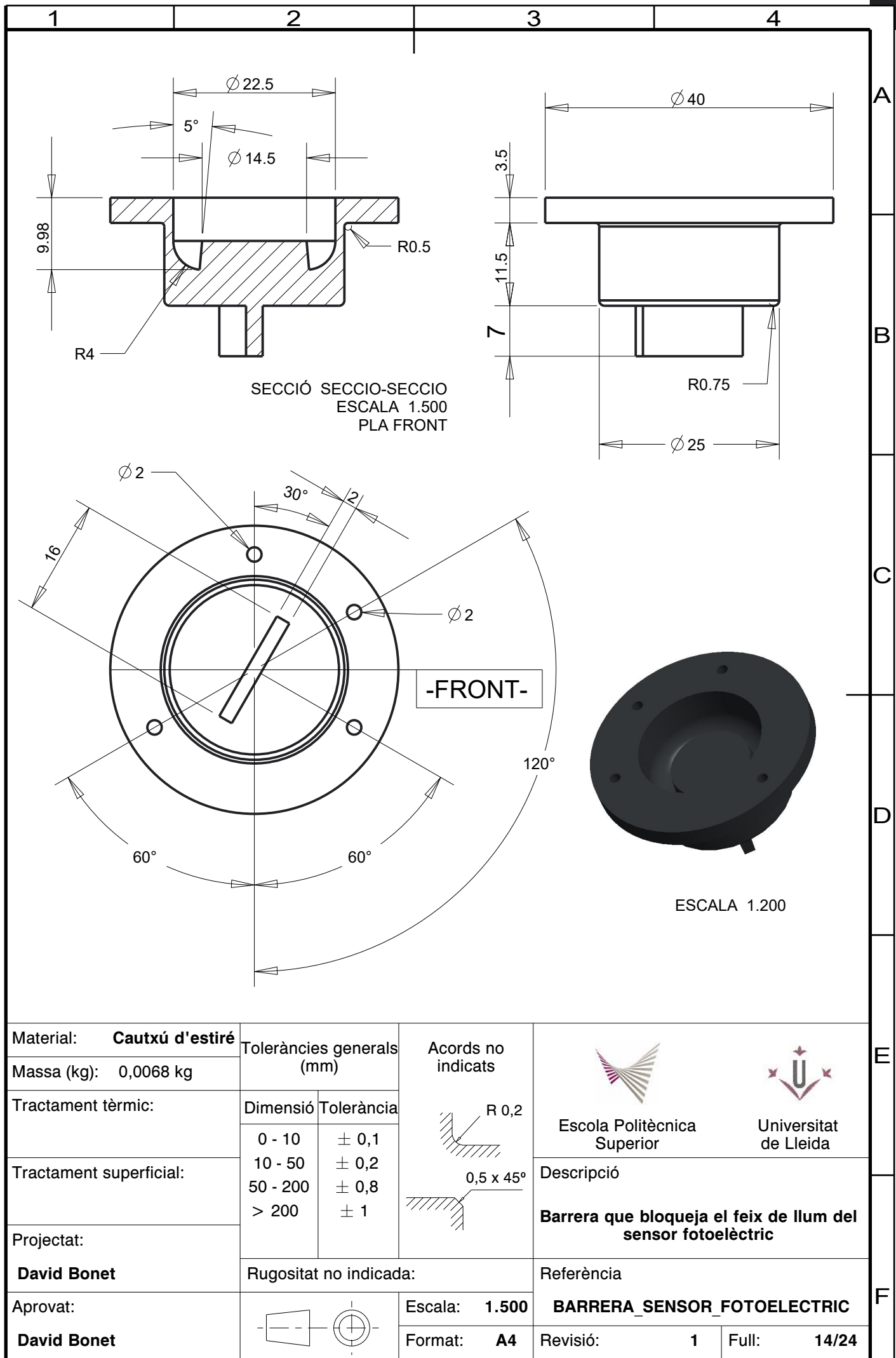
M2x.4 ISO - H
ROSCAR CON MACHO ∇ 7.200
1.6 TALADRAR (1.600)
PASANTE -(1) TALADRO

M2x.4 ISO - H
ROSCAR CON MACHO ∇
7.200 1.6 TALADRAR
(1.600) PASANTE
-(1) TALADRO

Material: Plàstic imp. 3D	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats  	 Escola Politècnica Superior	 Universitat de Lleida
Massa (kg): 0,3 kg				Descripció Estructura que suportarà el pes de la bateria, el ESC i l'Arduino	
Tractament tèrmic:	Dimensió	Tolerància			
	0 - 10	± 0,1			
	10 - 50	± 0,2			
	50 - 200	± 0,8			
	> 200	± 1			
Tractament superficial:	Rugositat no indicada:		Escala: 0.250	Referència SUPORT_BATERIA_ARDUINO_ESC	
Projectat:					
David Bonet			Format: A4	Revisió: 1	Full: 11/24
Aprovat:					
David Bonet					



Material: Plàstic imp. 3D	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats  R 0,2  0,5 x 45°		
Massa (kg): 0,00307 kg				Escola Politécnica Superior	Universitat de Lleida
Tractament tèrmic:	Dimensió	Tolerància		Descripció Suport de l'unitat ESC	
Tractament superficial:	0 - 10 10 - 50 50 - 200 > 200	± 0,1 ± 0,2 ± 0,8 ± 1			
Projectat:	Rugositat no indicada:		Escala: 1 Format: A4	Referència TAPA_VESC	
David Bonet					
Aprovat:			Revisió: 1 Full: 12/24		
David Bonet					



1

2

3

4

A

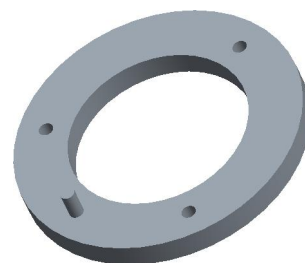
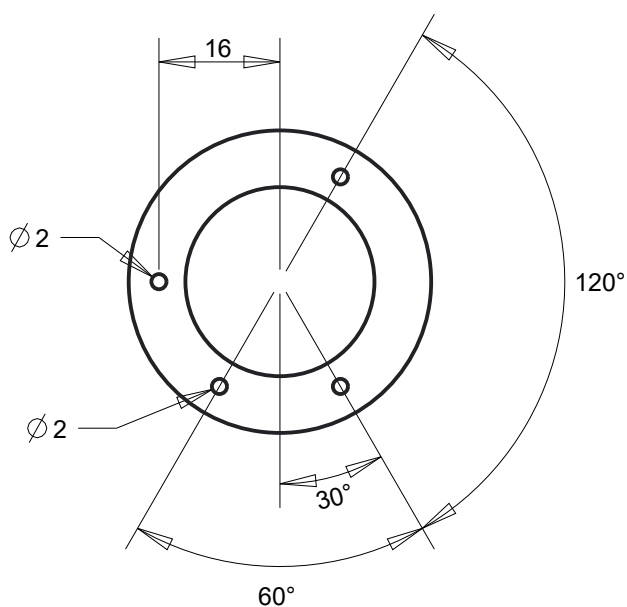
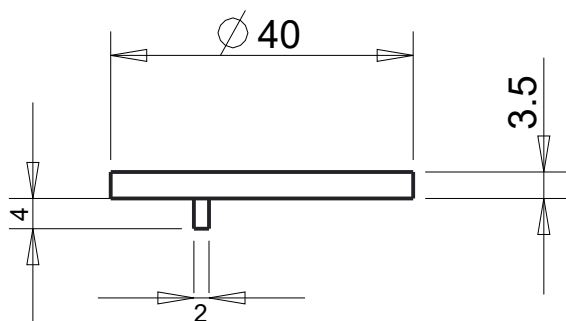
B



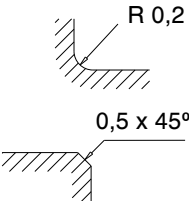
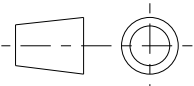
C

D

E

F



Material: Plàstic imp. 3D	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats			
Massa (kg): 0,003 kg						
Tractament tèrmic:	Dimensió	Tolerància			Descripció	
Tractament superficial:	0 - 10	± 0,1				
	10 - 50	± 0,2				
	50 - 200	± 0,8				
	> 200	± 1				
Projectat:	Rugositat no indicada:		Escala: 1.000	Referència		
David Bonet						FIXACIO_BARRERA_SENSOR_FOTOELEC
Aprovat:		Format: A4	Revisió: 1	Full: 15/24		
David Bonet						

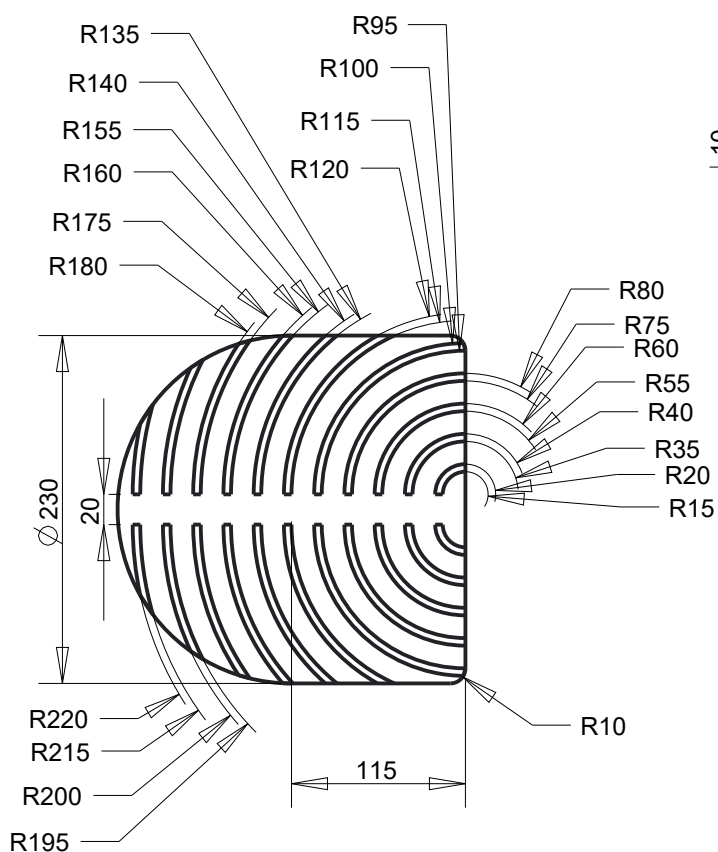
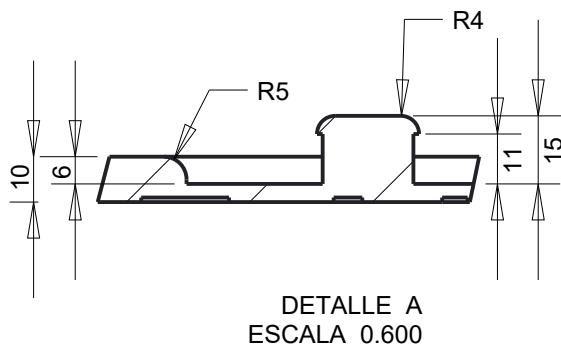
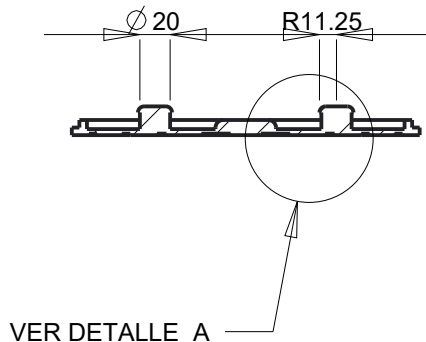
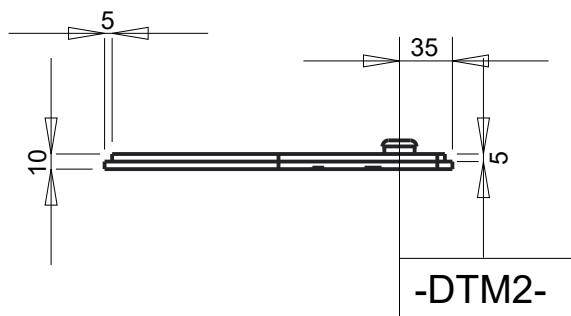
1

2

3



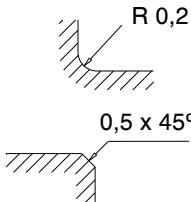
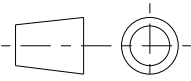
4

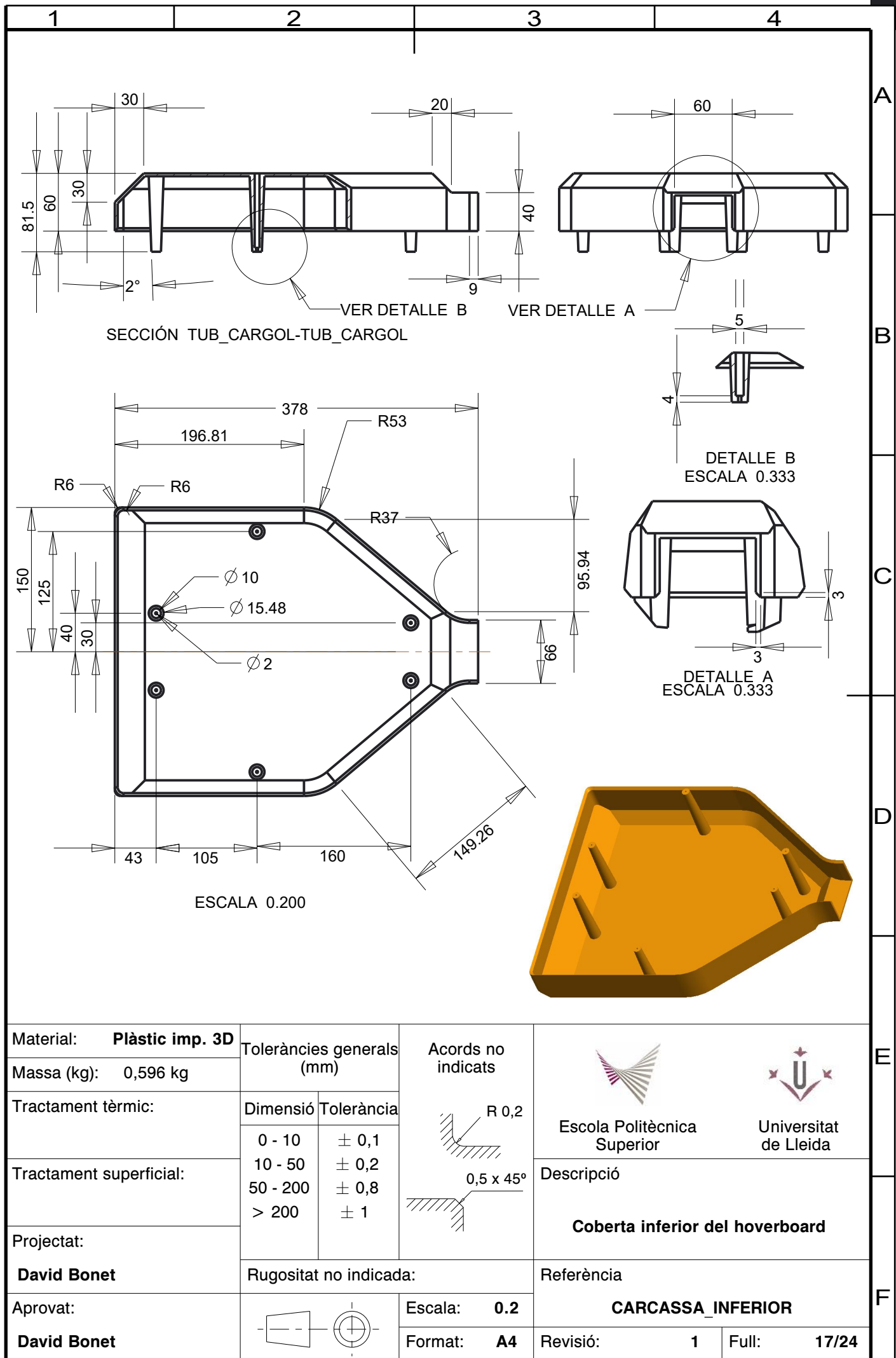
SECCIÓ SECCIO_REPOSAPEUS-SECCIO_REPOSAPEUS
PLA DTM2

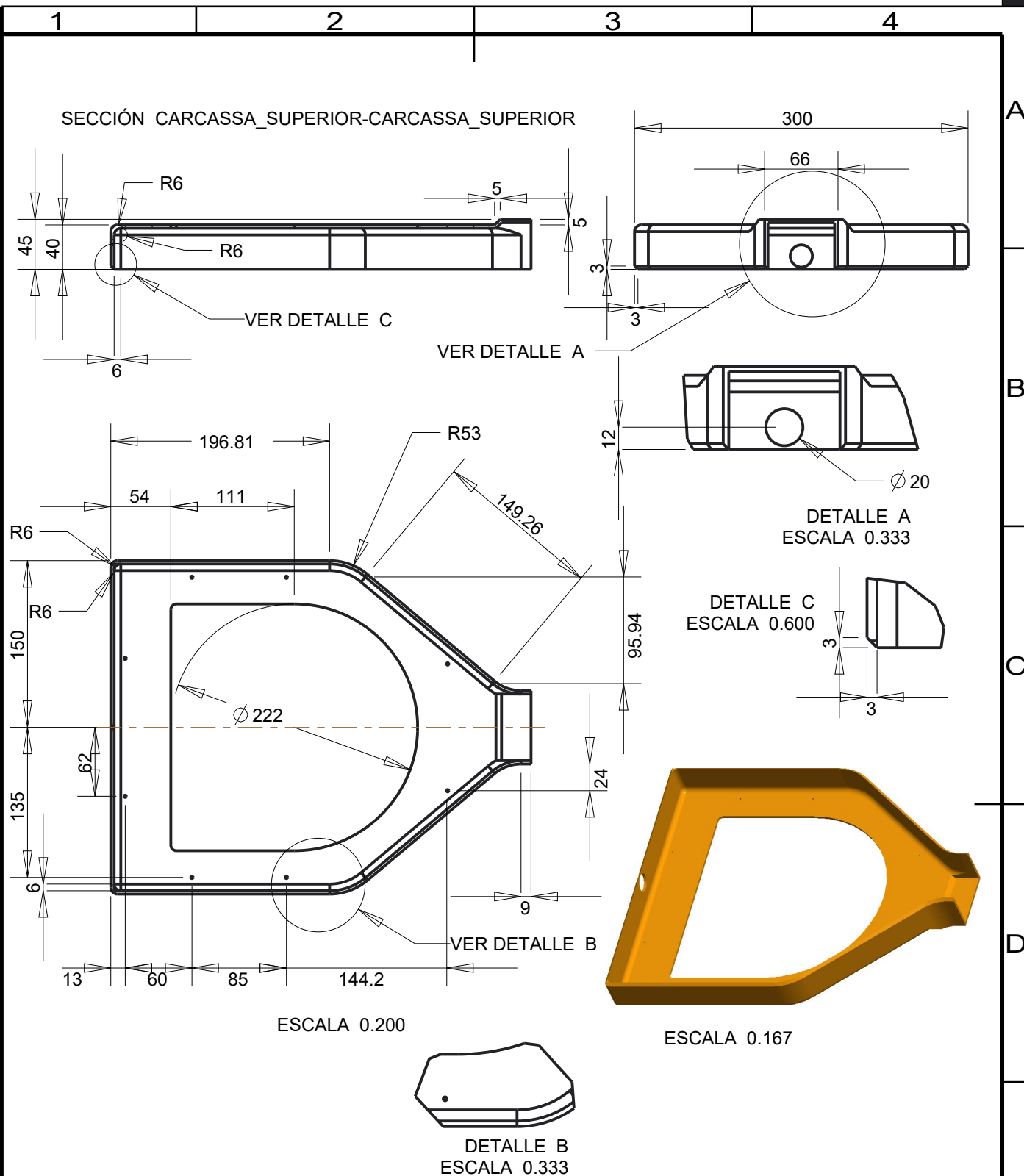


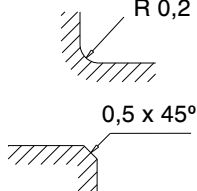


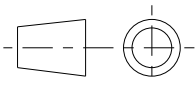
ESCALA 0.200

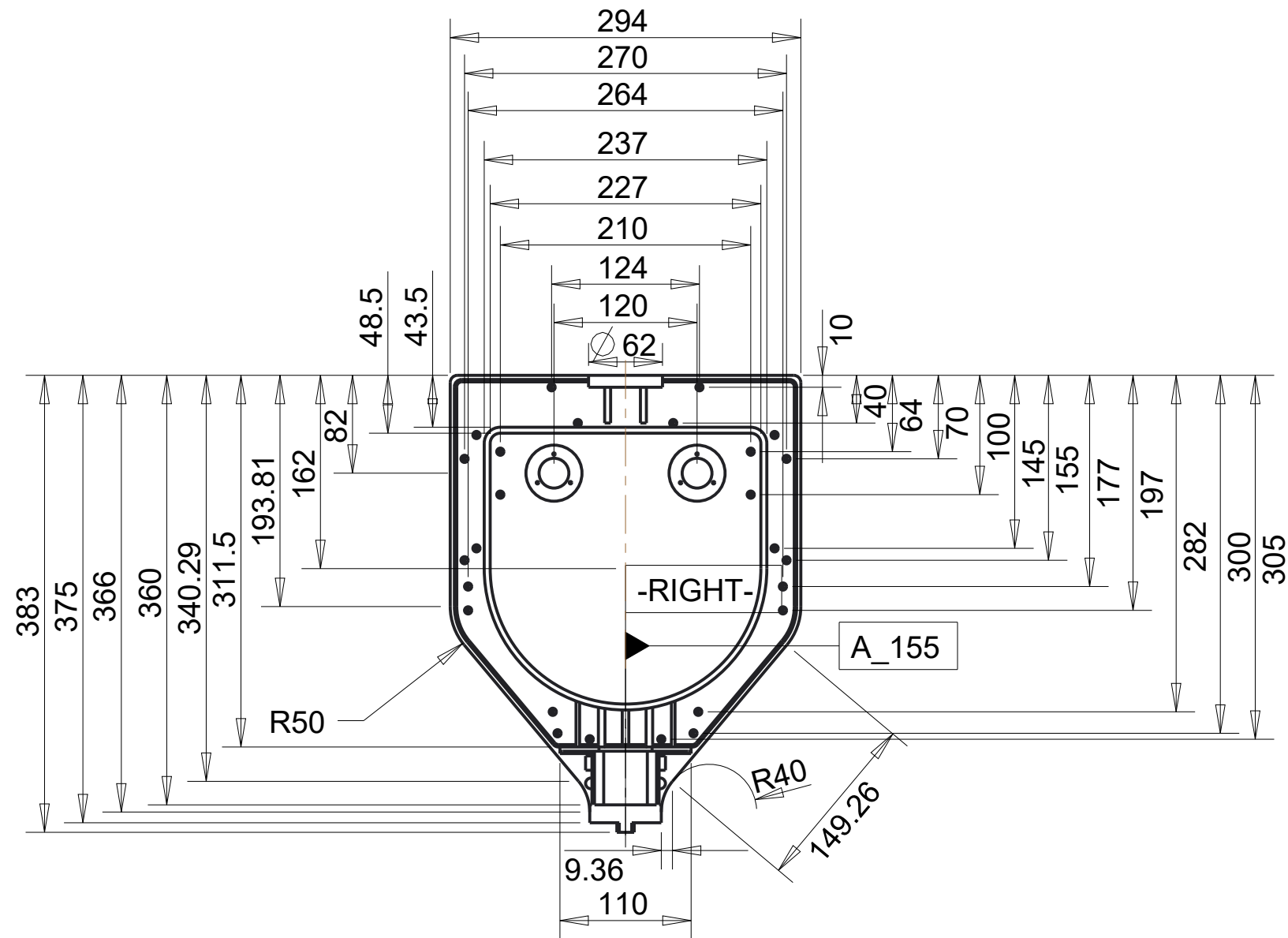
ESCALA 0.200

Material: Cautxú d'estiré	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats			
Massa (kg): 0,25 kg						
Tractament tèrmic:	Dimensió	Tolerància			Descripció	
	0 - 10	± 0,1				
Tractament superficial:	10 - 50	± 0,2	Superfície on descansen els peus			
	50 - 200	± 0,8				
	> 200	± 1				
Projectat:	Rugositat no indicada:			Referència		
David Bonet						
Aprovat:			Escala: 0.2	REPOSA_PEU		
David Bonet			Format: A4			
				Revisió: 1	Full: 16/24	

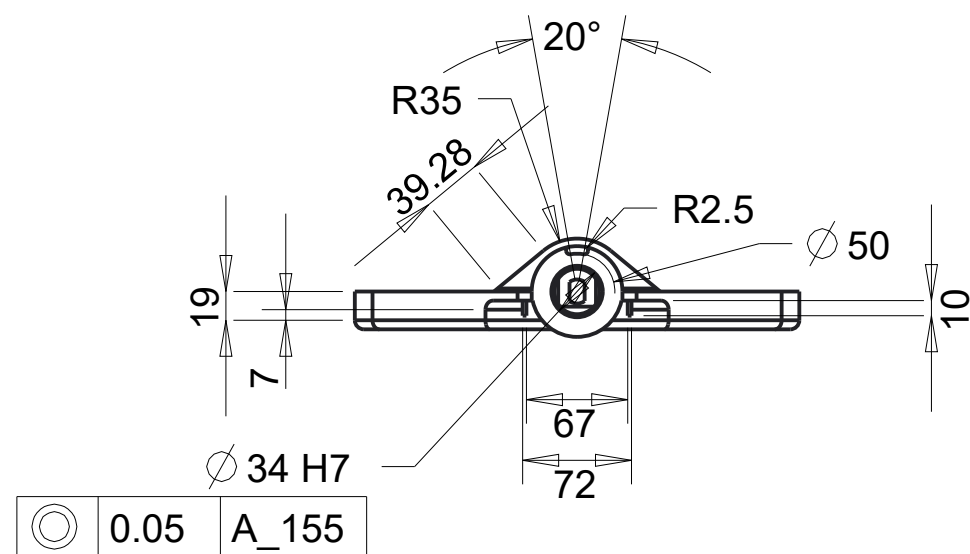
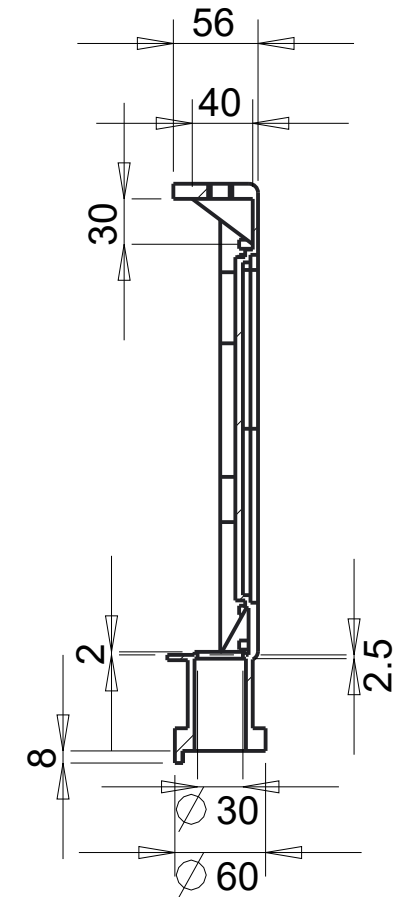


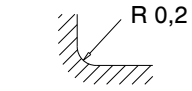
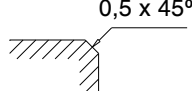


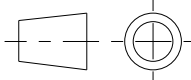


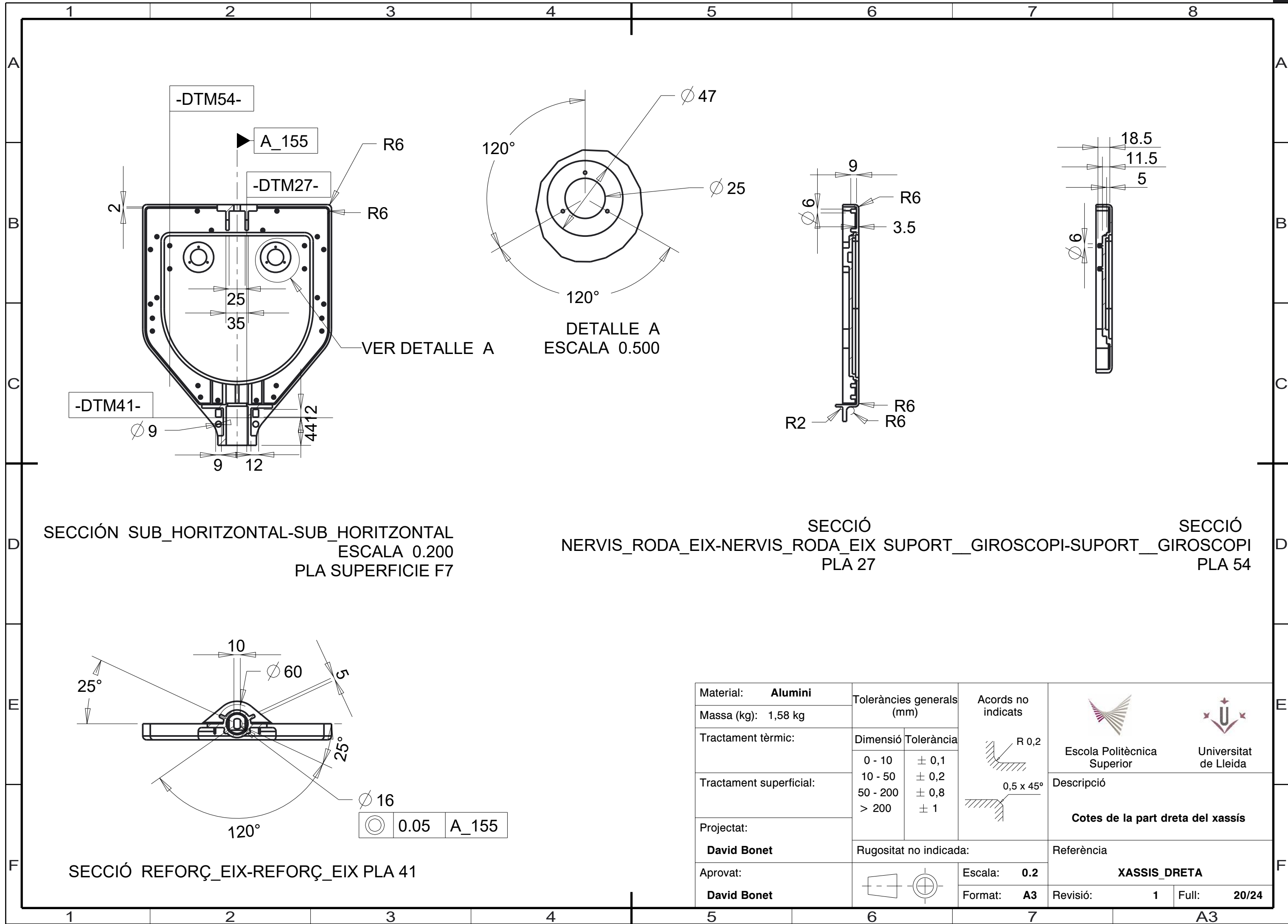
Material: Plàstic imp. 3D	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats			
Massa (kg): 0,33 kg						
Tractament tèrmic:	Dimensió	Tolerància			Descripció	
Tractament superficial:	0 - 10	± 0,1				
	10 - 50	± 0,2				
	50 - 200	± 0,8				
	> 200	± 1	Coberta superior del hoverboard			
Projectat:	Rugositat no indicada:			Referència		
David Bonet						
Aprovat:			Escala: 0.2	CARCASSA_SUPERIOR		
David Bonet			Format: A4			Revisió: 1

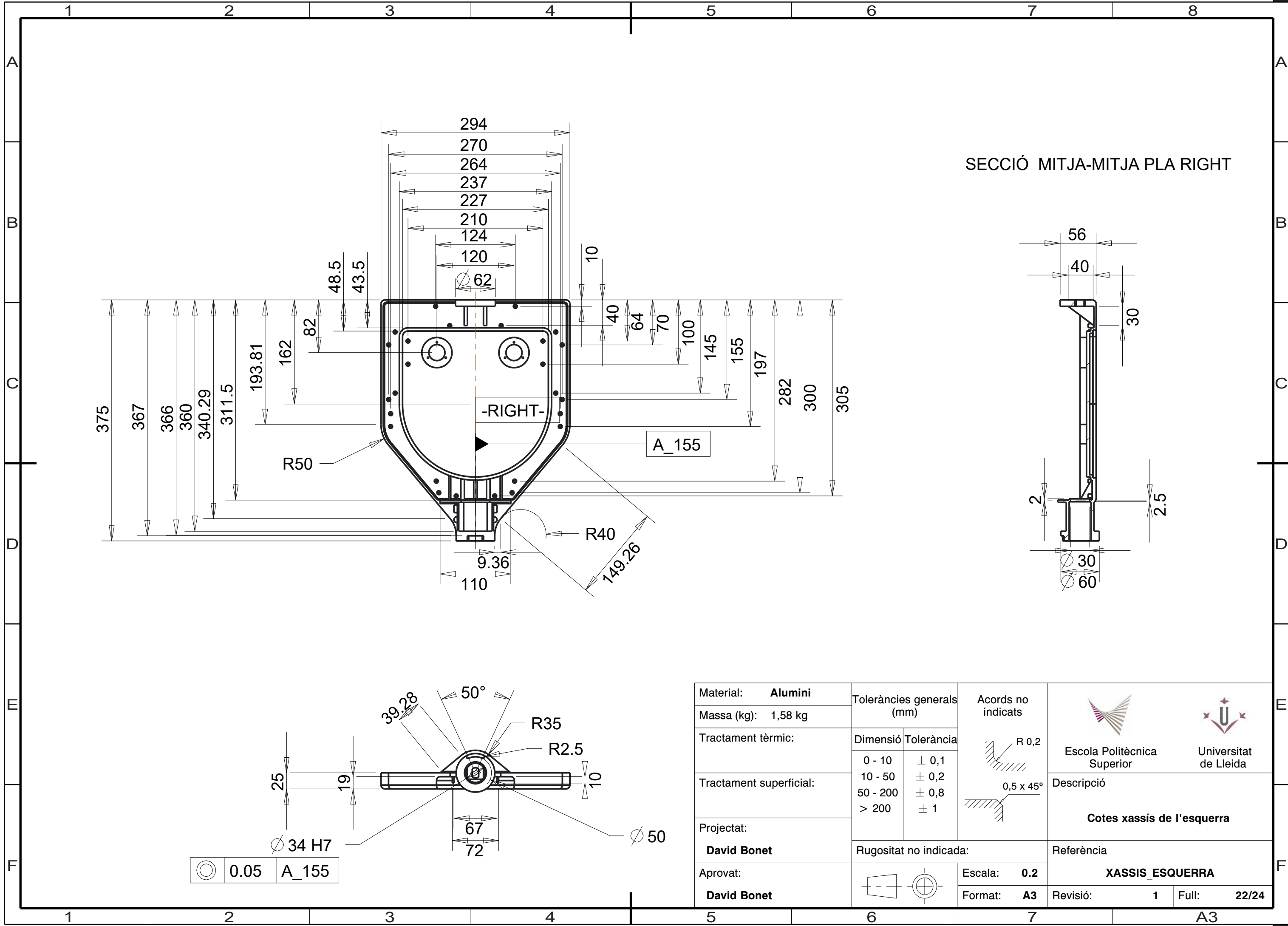


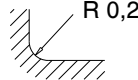
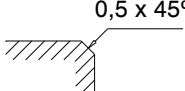


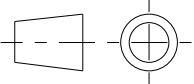
SECCIÓ MITJA-MITJA PLA RIGHT

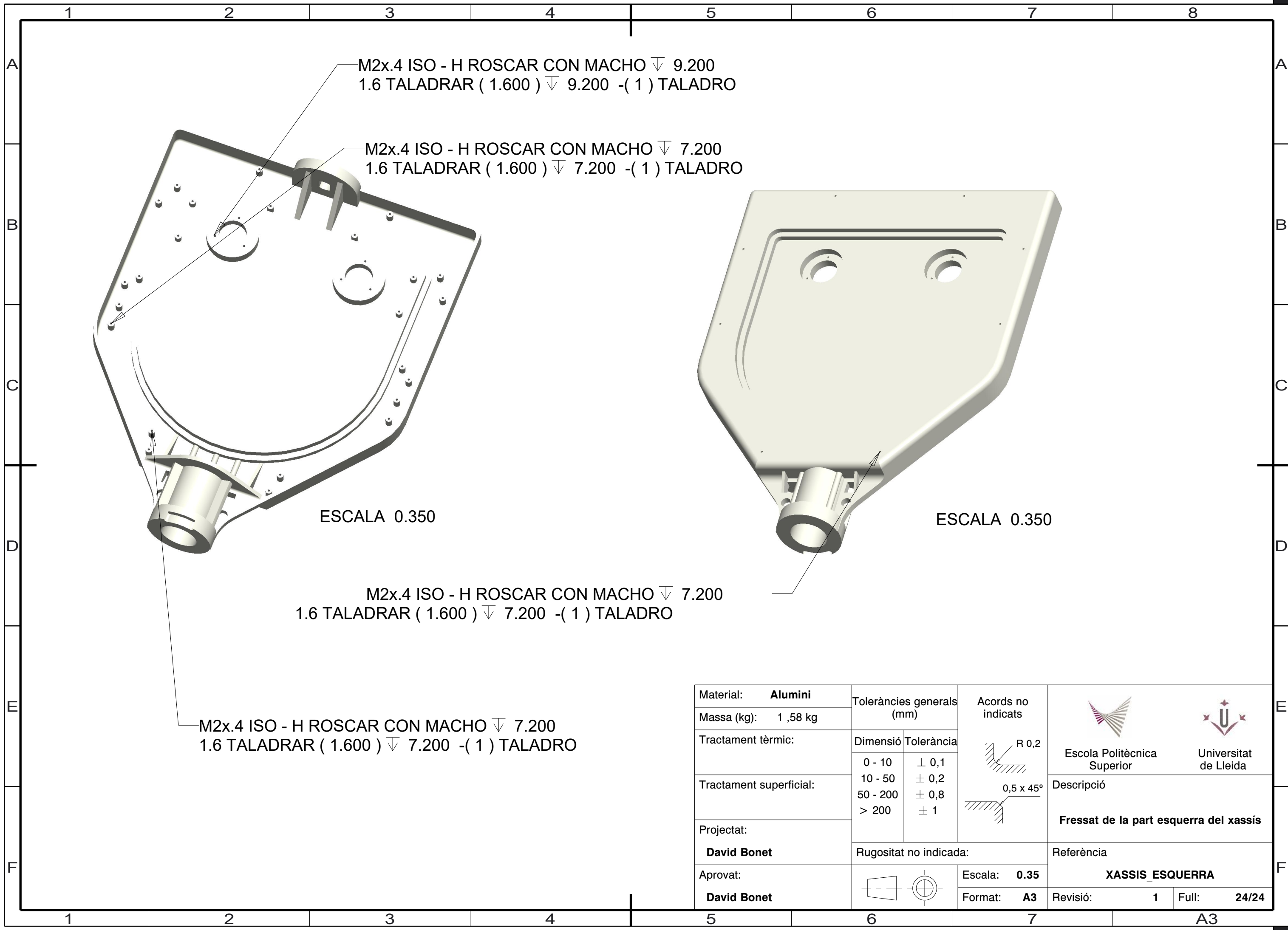



Material: Alumini	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats  	 Escola Politècnica Superior	 Universitat de Lleida
Massa (kg): 1,58 kg	Dimensió	Tolerància			
Tractament tèrmic:	0 - 10	± 0,1		Descripció Mesures de la part dreta del xassís	Referència XASSIS_DRETA
Tractament superficial:	10 - 50	± 0,2			
Projectat:	50 - 200	± 0,8			
Aprovat:	Rugositat no indicada:		Escala: 0.2	Revisió: 1	Full: 19/24
David Bonet			Format: A3		





Material: Alumini	Toleràncies generals (mm)		Acords no indicats  	 Escola Politècnica Superior	 Universitat de Lleida	
Massa (kg): 1,58 kg	Dimensió	Tolerància				
Tractament tèrmic:						
Tractament superficial:						
Projectat:	0 - 10 ± 0,1 10 - 50 ± 0,2 50 - 200 ± 0,8 > 200 ± 1	Descripció Cotes xassís de l'esquerra				
David Bonet	Rugositat no indicada:		Referència			
Aprovat:		Escala: 0.2	XASSIS_ESQUERRA			
David Bonet		Format: A3	Revisió: 1	Full: 22/24		



	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 6. Plec de condicions
	Pàgina: 103 de 119

Capítol 6. Plec de condicions

El model dissenyat en aquest projecte és indispensable que compleixi certes característiques a nivell de disseny físic i disseny electrònic. Si a l'hora de portar a la pràctica el projecte aquest no compleix alguna de les característiques descrites en aquest apartat, no es segur que l'aparell resultant del projecte sigui capaç de complir amb els requisits estipulants en aquest.

1.1. Condicions del disseny per la seguretat d'aquest

El corrent d'alimentació tan de l'Arduino com dels sensors connectats a aquest han d'alimentar-se amb el canal bec del ESC a 5V. El Voltatge que subministraran els ESC als motors no pot sobrepassar els 50V per complir el reglament de molt baixa tensió de seguretat, per aquest motiu entre les dues bateries a utilitzar s'obtidran 48V. Les connexions electròniques entre els diferents dispositius són les establertes en la il·lustració 31.


La velocitat de descarrega de les bateries ha de ser suficient per alimentar els dos motors a ple rendiment, per lo tant com es requeriran dues bateries cada una s'ha de poder descarregar a 35 A, ja que segons algunes dades que ens facilita el fabricant aquest motor pot requerir de 33A a ple rendiment.

És clau en el desenvolupament del projecte el parell que el motor es capaç de proporcionar, aquest no pot ser menor a 80 N·m per si en algun moment es dona la situació més desfavorable en la que es requereixen. Aquest motor ha d'incorporar sensors Hall per determinar la posició del rotor i per rebre informació sobre la força electromotriu.

El patí no pot fer més de 860 mm de llarg, degut a que ha estat dimensionat amb aquesta longitud, de la mateixa manera les rodes han estat dimensionades a 12 polsades.

El diàmetre del forat de l'articulació del xassís i el diàmetre exterior del boló han de complir la tolerància estipulada en el plànol. Els coixinets ubicats en l'articulació han de ser PAP 3020 P10. Aquests coixinets fan 30 mm i 34 mm de diàmetre interior i exterior respectivament i 20 mm d'amplada. És necessari que és col·loquin 2 coixinets a cada costat de l'eix i dos separadors de 20 mm d'amplada, de diàmetre interior 31 mm i de diàmetre exterior 34. A més a més, per poder fixar l'eix s'han d'utilitzar dos anells elàstics de diàmetre interior de 27,9 i que segueix la DIN 471.

Els cargols que s'utilitzen per fixar els sensors i suports, han de ser de mètrica 2, amb un pas de rosca de 0,4 mm i de 7,2 mm de longitud de tija, d'aquesta manera és segur que no hi hauran interferències entre peces. En canvi, els cargols en el xassís són de

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 6. Plec de condicions
	Pàgina: 104 de 119

mètrica 2, amb un pas de rosca de 0,4 mm i de 9,2 mm de tija. Per altra banda s'ha requerit d'una mètrica menor per fixar la IMU amb una mètrica 1 amb un pas de rosca de 0,25 mm i longitud de tija 5,3 mm. Els foto interruptors es fixaran a la placa utilitzant pegament.


1.2. Materials i fabricació ^[31] ^[32]

En la fabricació del xassís és important utilitzar un aliatge d'Al-Si 12 d'emmotllament, que compleix la L-252038.252, les dades d'aquest alumini es poden trobar en la il·lustració 34. Per obtenir una peça adequada l'espessor mínim del patí ha de ser de 3 mm, una vegada la peça surti del motllo s'hauran de mecanitzar els forats d'aquesta i alguns rebaixos. A l'hora de fer el motllo haurà de dissenyar amb material sobrant per a poder inclinar els cantons i que es pugui extreure amb facilitat.

Amb el boló, encarà que fabrica'l d'alumini serviria per què suportaria els esforços, el fet de que sigui d'alumini perjudica molt als coixinets i limita la seva vida de treball i fabricant-lo d'acer inoxidable es triplica la seva vida de treball. Per aquest motiu s'ha elegit fabrica'l d'acer inoxidable X20Cr13 F-3402 segons la UNE 36.016-89. Les propietats mecàniques d'aquest acer es poden trobar en la il·lustració 38.

Per les peces utilitzades en les superfícies on es recolzen els peus per activar i desactivar els sensors òptics, aquestes estaran fabricades d'un polímer elàstic com és el cautxú d'estirè (SBR). La característica elàstica d'aquests materials permet recuperar la forma un com l'usuari ha deixat d'aplicar força.

Per altra part la carcassa, els suports dels components electrònics han de ser fabricades de plàstic, degut que no té que sofrir esforços molt grans i és suficientment resistent, és fabricarà amb impressora 3D, amb un plàstic d'una densitat aproximadament de 1,25 g/cm³.


 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 6. Plec de condicions
	Pàgina: 105 de 119


1.3. Fitxes tècniques dels components electrònics

A continuació s'adjuntarà la informació relacionada amb les especificacions tècniques dels diversos elements que conformen la electrònica de l'hoverboard. Totes les dades proporcionades pel distribuïdors i fabricants dels elements és classificarà en taules.

1.3.1. Bateria


Taula 7: Especificacions de la bateria^[24]

Tipus de bateria	Bateria de ions de liti de 24 V 20 Ah		
Voltatge nominal	24 V		
	20 Ah		
Resistència de la font	40 m		
Tipus de cel·la (Cell compose)	1865 3,7 v 2,0 ah		
	7S10P		
Càrrega	Model de càrrega	CC CV	
	Carga estàndard actual	2 A (10 Hores)	
	Corrent de carga ràpida	5 A (4 Hores)	
	Voltatge de tall de càrrega	29,4 V	
	Voltatge de protecció de sobrecarrega de la cel·la	4,2 V / Cell	
Descàrrega	Corrent de descarrega nominal	30 A	
	Corrent de descarrega continua màxima	30 A	
	Corrent pic de descàrrega	90 A	
	Voltatge de tall de descàrrega	20 +/- 1 V	
	Tensió de protecció de sobre descàrrega de la cel·la	2,8 V / Cell	
Temperatura de treball	Càrrega estàndard	0 ~ 45 °C	
	Carrega ràpida	10 ~ 45 °C	
	Descàrrega estàndard	-20 ~65 °C	
Retenció de càrrega	95%		
Cicle de vida	800 - 1000 vegades		
Ajust del motor	720 W		
Dimensions	70 x 140 x 200 mm		
Forma	Paral·lelogram		
Pes	3,5 kg		
Certificacions	CE, UL, ROSH, UN38,3, MSDS		

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 6. Plec de condicions
	Pàgina: 106 de 119

1.3.2. Control electrònic de velocitat

Taula 8: Especificacions del ESC ^[20]


Maquinari	V4.12	
Firmware	V3.40	
PCB	4 capes, mida 40x60 mm	
Corrent	50 A continu / 240 A pic	
Voltatge	8V-60V (cèl·lules: 3-13S LiPo)	
BEC	5V a 1,5 A	
BEC type	Internal drive support	
Timing	Software calibration	
Motor control interface	PPM signal, analog, UART , I2C, USB or CAN-bus	
Cutoff voltatge	Programmable	
Freqüència	PWM input	
Governor	No	
Dimensions	60x40x20 mm	
Reverse	Yes	
Pes	0,08	

1.3.3. Unitat de mesura inercial "BNO055"

Taula 9: Especificacions dels paràmetres elèctrics del giroscopi ^[18]

Condicions de funcionament BNO055						
Pes		0,003 kg				
Paràmetres	Símbol	Condicció	Min	Typ	Max	Unit
Tensió d'alimentació (solament sensors)	V_{DD}	--	2,4	--	3,6	V
Tensió d'alimentació (μC i I/O Domini)	V_{DDIO}	--	1,7	--	3,6	V
Voltatge Input Nivell Baix (UART, I2C)	V_{DDIO_VIL}	$V_{DDIO_VIL} = 1,7 - 2,7 \text{ V}$	--	--	0,25	V_{DDIO}
		$V_{DDIO_VIH} = 2,7 - 3,6 \text{ V}$	--	--	0,3	V_{DDIO}
Voltatge Input Nivell Alt (UART, I2C)	V_{DDIO_VIH}	$V_{DDIO_VOL} = 1,7 - 2,7 \text{ V}$	0,7	--	--	V_{DDIO}
		$V_{DDIO_VOH} = 2,7 - 3,6 \text{ V}$	0,55	--	--	V_{DDIO}
Voltatge Output Nivell Baix (UART, I2C)	V_{DDIO_VOL}	$V_{DDIO_POT+} > 3V, I_{OL} = 20mA$	--	0,1	0,2	V_{DDIO}
Voltatge Output Nivell Alt (UART, I2C)	V_{DDIO_VOH}	$V_{DDIO_POT+} > 3V, I_{OL} = 10mA$	0,9	0,8	--	V_{DDIO}
POR Llindar de la tensió de VDDIO-IN augmentant	V_{DDIO_POT+}	V_{DDIO} descàrrega a 1 V/ms o mes baix	--	1,45	--	V
POR Llindar de la tensió de VDDIO-IN Disminuint	V_{DDIO_POT-}		--	0,99	--	V
Temperatura de funcionament	T_A	--	- 40	--	+ 85	°C
Corrent d'alimentació total mode normal a T_A (9DOF @100Hz output data rate)	$I_{DD}+I_{DDIO}$	$V_{DD} = 3 \text{ V}, V_{DDIO} = 2,5 \text{ V}$	--	--	12,3	MA
Corrent de alimentació total mode de Baixa potència a T_A	I_{DD_LPM}	$V_{DD} = 3 \text{ V}, V_{DDIO} = 2,5 \text{ V}$	--	--	0,4	MA
Corrent d'alimentació total mode de suspensió a T_A	I_{DD_SuM}	$V_{DD} = 3 \text{ V}, V_{DDIO} = 2,5 \text{ V}$	--	--	0,04	mA

En l'Annex 3.1. característiques elèctriques de la unitat de mesura inercial s'han agrupat les característiques elèctriques segons si es tracta del giroscopi, acceleròmetre o magnetòmetre de la IMU. En el mateix annex s'adjunten les mesures del sensor.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 6. Plec de condicions
	Pàgina: 108 de 119

1.3.4. Interruptor fotoelèctric FC-03


Taula 10: Especificacions del FC-03^[19]

Voltatge de funcionament	3,3V - 5V DC	
Sortides	Analògiques i digitals	
Sensor	MOCH22A	
Model Placa	FC-03/FZ0888	
Tipus de emissor	Fotodiode IR	
Tipus de detector	Fototransistor	
Longitud d'ona del emissor	950 nm (Infraroig)	
Pes	8g	
Dimensions	3,2x1,4x0x7 cm	
Ranura	5 mm	
Comparador operacional amplificador	LM393	
Sortida TTL ON	Sensor bloquejat	
Sortida TTL OFF	Sensor sense bloquejar	


En l'Annex 3.1. característiques elèctriques del foto interruptor (MOCH22A), s'han agrupat en taules les característiques d'aquest.

1.3.5. Arduino

Taula 11: Especificacions de l'Arduino^[33]


Microprocessador	ATmega328	
Memòria flash	32 kB	
Voltatge de funcionament	2.7V - 5,5V	
Voltatge d'entrada (recomanat)	7-12V	
Voltatge d'entrada (límit)	6-20V	
Pins digitals I/O	14 dels quals 6 proporcionen sortida PWM	
Pins digitals PWM I/O	6	
Pins d'entrada analògica	6	
Corrent DC pel Pin I/O	20 mA	
Corrent DC pel Pin de 3,3V	50 mA	
Velocitat de rellotge	16 MHz	
Pes	25g	
Temperatura de funcionament	-40 a 85°C	

En l'Annex 3.3 Dimensions Arduino estan representades les mesures de l'Arduino i les distàncies dels forats per fixa'l.

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 6. Plec de condicions
	Pàgina: 109 de 119

1.3.6. Motor

Taula 12: Especificacions del motor^[21]

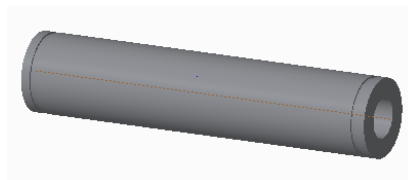
Voltatge de funcionament	60V per defecte(48V - 96V, opcional)	
Corrent de bateria	33~40A	
Parell pic	109 N.m	
Potència nominal	1000 W (Pics de 2000W)	
Velocitat nominal	25-45 km/h	
Eficiència màxima	84%	
Angles de desfasament dels sensors Hall	120º	
IP	54	
Pes	8 kg amb el pes del fre inclòs	
Imants	23 parells d'imants	
Grandària motor	10"	
Fre	Optatiu (innecessari)	
Sensors Hall	Optatius (necessaris)	
Eix	Doble	

En l'Annex 3.4. Dimensions del motor Brushless de cub s'han representat les dimensions del motor facilitades pel fabricant.

1.4. Esquema de muntatge i construcció del disseny

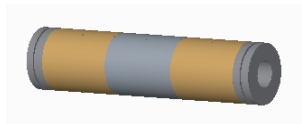
Per tal de poder fer el muntatge de l'aparell, s'han de seguir els següents passos:

1. Partint de l'eix.



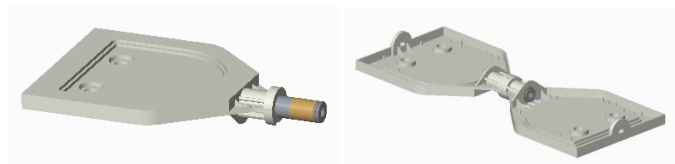
Il·lustració 55: Eix

2. Introduir els separadors i els coixinets en l'eix, degut a que el joc és a mà.



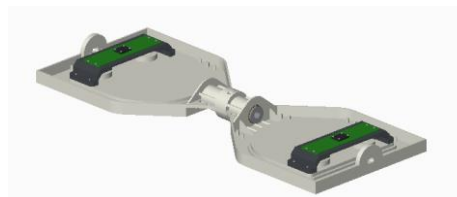
Il·lustració 56: Unió d'eix, separadors i coixinets

3. Unir les dues parts del xassís amb l'eix, mitjançant anells elàstics per bloquejar el desplaçament de l'eix axial.



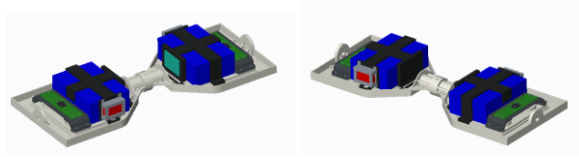
Il·lustració 57: muntatge del conjunt eix i xassís

4. Acoblar els subconjunts de l'estructura que conté la placa amb els sensors giroscopis i els foto interruptors.



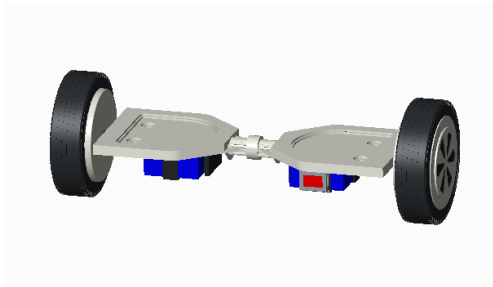
Il·lustració 58: Acoblar conjunt dels sensors al xassís

5. Acoblar un subconjunt de l'estructura que conté la bateria, el suport del ESC, aquest i l'Arduino i un altre sense, degut a que només és necessari un, ja que les dues parts es comuniquen per un forat a través de l'eix.



Il·lustració 59: Acoblar conjunt bateria, ESC i Arduino

6. Acoblar les rodes a les orelles del xassís, mitjançant una femella de la roda de mètrica 16 segons el fabricant.



Il·lustració 60: acoblament del conjunt de les rodes

7. Una vegada els conjunts del sistema s'han fixat, s'uniran les barreres dels 4 foto interruptors al xassís amb les seves respectives fixacions i cargols.




Il·lustració 61: Barreres interruptors sensors foto elèctrics

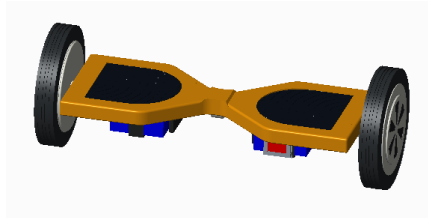
8. Col·locar els reposa peus, per a que entrin en contacte amb la barrera dels sensors fotoelèctrics.



Il·lustració 62: Acoblar reposa peus

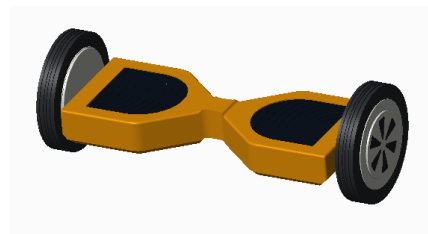
 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 6. Plec de condicions
	Pàgina: 112 de 119

9. Aquests es fixaran amb la carcassa superior s'acoblarà al xassís mitjançant uns cargols. Això es possible degut a que el forat es més petit amb un marge de 4 mm per poder subjectar el reposa peus.




Il·lustració 63: Unió de la carcassa superior

10. Finalment es tapa l'interior de la màquina, fixant la carcassa inferior amb cargols a la superior.



Il·lustració 64: Unió de la carcassa inferior al pati per completar-lo


 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 7. Amidaments
	Pàgina: 113 de 119

Capítol 7. Amidaments

A continuació s'ha organitzat un llistat amb els components electrònics, els components estructurals normalitzats i dissenyats. En la taula que hi ha a continuació s'ha representat la quantitat de cada component necessària en la fabricació del Hardware del Hoverboard.

Taula 13: Quantitat dels components del Hardware del hoverboard

Components	
Components electrònics	Quantitat
Arduino UNO	x1
Bateria	x2
BNO055 (IMU)	x2
Cablejat	X37 sense contar els sensors Hall
FC-03 (Sensor òptic)	X4
Flipsky (ESC)	X2
QS Motor hub Brushless	X2
Protoboard	X1
Total	
Components estructurals normalitzats	Quantitat
Anells elàstics	X2
Cargol M1 long. tija 5,3 mm	X8
Cargols M2 long. tija 7,2 mm	X40
Cargols M2 long. tija 9.2 mm	X56
PAP 3020 P10 (coixinets)	X4
Total	
Components estructurals dissenyats	Quantitat
Barrera sensor fotoelèctric	X4
Carcassa superior	X2
Carcassa inferior	X2
Eix	X1
Fixació barrera sensor fotoelèctric	X4
Placa sensor IMU i foto interruptors	X2
Separadors	X2
Suport bateria, Arduino i ESC	X2
Suport placa	X2
Tapa ESC	X2
Xassís dret	X1
Xassís esquerra	X1

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 8. Pressupostos
	Pàgina: 114 de 119

Capítol 8. Pressupostos

Tenint en compte: el preu, la quantitat de material de cada peça, que s'ha de multiplicar per 2,5 pel material extra a utilitzar per fer els abeuradors en les peces extrems de la forja i d'aquestes mateixes se li suma un 20% del preu de la peça tenint en compte les hores de mecanitzat. S'han calculat els preus dels components estructurals en la taula següent. A més a més, s'han sumat els pesos de tots els components estructurals dissenyats.


Taula 13: Preus dels components estructurals dissenyats

Components estructurals dissenyats	Massa (kg)	Quantitat	Material	€/kg	Preu peça €	Preu conjunt €
Barrera sensor interruptor	0,0068 kg	X4	Cautxú d'estirè	1,5	0,0255€	0,102€
Carcassa superior	0,330 kg	X2	Plàstic imp. 3D	18	5,94€	11,88€
Carcassa inferior	0,596 kg	X2	Plàstic imp. 3D	18	10,73€	21,46 €
Eix	0,617 kg	X1	Acer inox.	2	3,085€	3,085€
Fixació barrera interruptors	0,003 kg	X4	Plàstic imp. 3D	18	0,054€	0,216€
Placa sensor IMU i interruptors	0,0709 kg	X2	Plàstic imp. 3D	18	1,2762€	2,55€
Reposa peus	0,249 kg	X2	Cautxú d'estirè	1,5	0,3735€	0,747€
Separadors	0,004 kg	X2	Cautxú d'estirè	1,5	0,006€	0,012€
Suport bateria, Arduino i ESC	0,3 kg	X2	Plàstic imp. 3D	18	5,4€	10,8€
Suport placa	0,0903 kg	X2	Plàstic imp. 3D	18	1,6254€	3,25€
Tapa ESC	0,0307 kg	X2	Plàstic imp. 3D	18	0,5526€	1,105€
Xassís dret	1,58 kg	X1	Alumini-Silici	8	37,92€	37,92€
Xassís esquerra	1,58 kg	X1	Alumini-Silici	8	37,92€	37,92€
Total components dissenyats	7,158 kg					131,047 €

A continuació s'ajunta una taula dels components normalitzats, per fer-la s'han buscat preus en diferents proveïdors per tenir una orientació del preus d'aquets components.

Taula 14: Preus dels components estructurals normalitzats

Components estructurals normalitzats	Quantitat	Preu unitat €	Preu conjunt €
Anells elàstics	x2	0,005€	0,010€
Cargols M1 long. tija 5,3 mm	x8	0,025€	0,2€
Cargols M2 long. tija 7,2 mm	x40	0,028€	1,12€
Cargols M2 long. tija 9.2 mm	x28	0,032€	0,896 €
PAP 3020 P10 (coixinets)	x4	10€	40€
Total components normalitzats			42,226€


 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 8. Pressupostos
	Pàgina: 115 de 119

Els components electrònics s'han agrupat en una taula on s'indica el pes per unitat, el preu unitari i del total de peces que s'acabaran muntant en l'Hoverboard.

Taula 15: Preus dels components electrònics

Components electrònics	Pes (kg)	Quantitat	Preu unitat €	Preu conjunt €
Arduino UNO	0,025 kg	x1	20€	20€
Bateria	3,5 kg	x2	282,5€	565€
BNO0055 (IMU)	0,003 kg	x2	32,5€	65€
Cablejat		x37	3€ per lot	3€
FC-03 (Sensor òptic)	0,008 kg	x4	6,5€	26€
Flipsky (ESC)	0,08 kg	x2	75€	150€
QS Motor hub Brushless	8 kg	x2	102€	204€
Protoboard	0,05 kg	x1	4€	4€
Total	23,273 kg			1033€

D'aquestes tres taules si es suma el pes total, el patí pesarà sobre uns 30 kg. Si es suma el preu total de les tres taules dona el preu total del Hoverboard, el qual ascendeix a 1206,273 €.

	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 9. Conclusions
	Pàgina: 116 de 119

Capítol 9. Conclusions


En aquest projecte s'ha dissenyat el patí Hoverboard auto equilibrable, tenint en compte els requeriments per aconseguir un patí que no solament sigui un joguet sinó que sigui un vehicle unipersonal, per a que aguantí el pes de una persona de 90 kg més el pes del patí que és de 30 kg. Com en un principi es va plantejar s'ha comprés com treballa el patí i quina és la funció específica a realitzar pels diferents components, com es comuniquen entre ells i quines respostes envia el microprocessador com a resposta als actuadors.

Encara que el pes del pati és bastant elevat s'han realitzat els càlculs estructurals pertinents per garantir que aguanta els esforços als que pot estar sotmès, com poden ser les orelles on es subjecten les rodes, el xassís, inclús la fatiga en peces com els coixinets i l'eix. És podria afirmar que es un patí més segur que els comuns, degut a que en el disseny es dels pocs que en l'eix per pivotar s'han afegit uns coixinets per eliminar la fricció entre superfícies metàl·liques.

També s'ha pogut incorporar uns motors capaços de moure el patí a una velocitat de 30 km/h i que permeten puja pendent del 30%. Al incorporar aquest motors s'ha augmentat la potència del patí, però això a repercutit en el pes total del patí, que ha augmentat exageradament ja que els dos motors de les rodes són aproximadament el 50% del pes total del patí. I juntament amb les bateries, són del 65% del cost total.


Pel que fa als pressupostos, s'han fet del preu que podria costar fabricar el hardware d'un d'aquests patinets, però degut a que en les comandes dels components individuals i materials els preus són més elevats, sobretot el preus de les bateries i del motors que eleva per sobre de 1000 euros el preu del hoverboard. Comparat amb altres hoverboards del mercat, és un aparell molt car, però també molt més potent que els que es poden comprar en les botigues, que poden tenir una potència de 500W, ja que rarament es fabriquen Hoverboard suficientment potents per a que un adult pugui desplaçar-se a una velocitat alta i/o superar pendents alts.

Finalment, els principals punts a millorar són el preu i el pes del hoverboard ja que són massa elevats. Degut a inconvenients com ha set limitar el voltatge d'alimentació dels motors al que estableix el codi tècnic de molt baixa tensió, per aquest motiu no es possible alimentar els motors amb més voltatge per aconseguir un parell més elevat i per lo tant moure una carga més elevada amb un mateix motor, com inicialment s'havia plantejat amb un cas límit d'una persona de 120 kg. Tot i això, s'ha realitzat el projecte amb èxit degut a que s'ha aconseguit realitzar el disseny del hardware d'un hoverboard i com a conseqüència s'ha apropiat als adults aquesta nova forma de desplaçament.


 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 10. Bibliografia
	Pàgina: 117 de 119

Capítol 10. Bibliografia

- [1] Origen hoverboard. <https://elpatinete.net/como-functiona-un-hoverboard/>
- [2] Ventatges, desventatges, tipus hoverboards, tot terrenys. https://www.skateelectrico.com/hoverboard/#Diseno_esquematico_de_las_p_artes
- [3] ESC <http://fpvmax.com/2016/12/21/variador-electronico-esc-functiona/>
- [4] Acceleròmetre: <https://www.dimensionengineering.com/info/accelerometers>
- [5] Giroscopi
https://www.5hertz.com/index.php?route=tutoriales/tutorial&category_id=1&tutorial_id=13#2
- [6] Microprocessador <https://concepto.de/microprocesador/>
- [7] Normativa de circulació https://patineteelectrico.shop/wp-content/uploads/2018/07/Instr_16_V_124_Vehiculos_Movilidad_Personal.pdf
- [8] MPU (giroscopi, acceleròmetre i magnetòmetre).
<https://robologs.net/2014/10/15/tutorial-de-arduino-y-mpu-6050/>
- [9] Fotointerruptors. <https://www.rohm.com/electronics-basics/photointerrupters/what-is-a-photointerrupter>
- [10] Components i funcionament hoverboard.
<https://bestelectrichoverboard.com/how-do-self-balancing-scooters-work/>
- [11] comparació transmissió directa i reducció: <https://electricbikereport.com/electric-bike-direct-drive-gear-hub-motors/>
- [12] Fre regeneratiu. <http://www.patineteelectrico.net/patinete-electrico-con-freno-regenerativo/>
- [13] Unitat de mesura inercial
<http://www.iescamp.es/miarduino/2016/05/10/trabajando-con-sistemas-de-inercia/>
- [14] ESC <http://fpvmax.com/2016/12/21/variador-electronico-esc-functiona/>
- [15] Tipologies de bateries
<http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/PresentacionBaterias.pdf>
- [16] Tipologies de bateries <https://es.scribd.com/doc/44184578/Baterias-primarias-y-secundarias>

 <div> Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior </div>	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 10. Bibliografia
	Pàgina: 118 de 119

- [17] Unitat de mesura inercial <https://tienda.bricogeek.com/medicion-inercial-imu/802-sensor-inercial-absoluto-9-dof-bno055.html>
- [18] Datasheet unitat de mesura inercial https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST_BNO055_DS000_12.pdf
- [19] Datasheet Sensor fotoelèctric <https://naylampmechatronics.com/robotica-movil/240-encoder-infrarrojo.html>
- [20] Control electrònic de velocitat Flipsky <https://flipsky.net/collections/electronic-products/products/torque-esc-vesc-%C2%AE-bldc-electronic-speed-controller>
- [21] Motor brushless Qs motor 1000w
http://www.cnqsmotor.com/en/article_read/QS%20350W%20-%201000W%20205%2035H%20V1%2048V%20ebike%20e%20bike%20brushelss%20dc%20in%20wheel%20motor%20for%20bicycle/613.html
- [22] Gràfica brushless Qs motor https://wholesaler.alibaba.com/product-detail/2018-New-QS-10x3-0inch-48v_60278454783.html
- [23] motor brushless caractéristiques https://es.aliexpress.com/store/product/QS-MOTOR-10-2-15inch-1000W-205-35H-V1-48V-Brushelss-DC-Electric-Scooter-Motorcycle-Wheel/1389549_32812636412.html?spm=a219c.search0104.3.1.4dba51f6HMMPiv&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_8_10065_10068_10547_319_10891_317_10548_10696_10084_453_454_10083_10618_10307_10820_10821_10301_10303_537_536_10902_10059_10884_10887_321_322_10103-10891,searchweb201603_51,ppcSwitch_0&algo_expid=dfc26dfc-0449-4335-8462-5ccf660b9253-0&algo_pvid=dfc26dfc-0449-4335-8462-5ccf660b9253&transAbTest=ae803_5
- [24] Bateria liti <https://es.dhgate.com/product/replacement-akku-li-ion-24v-20ah-lithium/423751526.html#vhpd-3-5|null:null:r1582614854>
- [25] Catàleg coixinets
<https://www.rodaunion.es/media/imagenes/Catalogos/Rodamientos%20y%20accesorios/INA/Rotativo/Casquillos Permaglide 706 es.pdf>
- [26] Anells elàstics https://mdmetric.com/prod/beneri/26-73%20Beneri_catalog2013.pdf
- [27] Mesures Arduino UNO <http://www.rcbasseterre.fr/arduino-uno-r3-dimensions/>

 Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior	Títol:
	Autor: David Bonet Palau
	Capítol 10. Bibliografia
	Pàgina: 119 de 119

[28] Dimensions IMU BNO055 <https://learn.adafruit.com/adafruit-bno055-absolute-orientation-sensor?view=all>

[29] Característiques fototransistor del foto interruptor
<https://drive.google.com/file/d/0B1J9qyPHf11ISDlnb3F0RmJ5ZG8/view>

[30] Dimensions Arduino UNO <http://www.rcbasseterre.fr/arduino-uno-r3-dimensions/>

[31] Disseny de màquines VI Selecció de materials 2
<https://www.google.com/search?q=disseny+de+maquines+iv+seleccio+de+materials+2&og=dis&aqs=chrome.1.69i57j69i59j0l2j69i61j0.3140j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

[32] Disseny de màquines VI Selecció de materials 1
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36685/9788498800814.pdf>

[33] Especificacions Arduino UNO <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
<https://flipsky.net/products/torque-esc-vesc-%C2%AE-bldc-electronic-speed-controller>